

Savunma Bilimleri Dergisi

The Journal of Defence Sciences

Millî Savunma
Üniversitesi

Alparslan Savunma
Bilimleri ve Millî
Güvenlik Enstitüsü



Güneş Enerji Potansiyeli Yüksek Bir Bölgede PVsyst Yazılımı
Kullanarak PV Sistemin Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi

Erşan Ömer YÜZER

Hava Savunma Sistemlerinin Performansının Entropi Ağırlıklı
TOPSIS Yöntemi İle Değerlendirilmesi

Ayşe EDİZ - Şenol ALTAN - Salih TAŞDEMİR

Comparative Investigation of Triboelectric Energy Harvesting Modes:
A Simulation Study

Ali Ekber ÖZDEMİR - Sibel AKKAYA OY

k Grup Regresyon Modelinin Eşitliği için Kullanılan Testlerinin
Karşılaştırılması

Faik Ümit DİRİ - Fikri GÖKPINAR - Esra GÖKPINAR

Kömür Kullanımı ile Üretilen Enerji Miktarının Yapay Sinir Ağı
Modeliyle Tahmini: Çin Üzerine Örnek Uygulama

Mehmet Hurşut GÜVEN - Faruk KILIÇ - Faik Ümit DİRİ

Metal İşleme Sektöründe Endüstri 4.0 Olgunluk Modeli Uygulaması
ve Değerlendirilmesi

**Sultan GÜL ÖZDAMAR - Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR -
Süleyman ERSÖZ**

Examining the Factors Driving Military Innovation Using the Fuzzy
DEMATEL Method: A Case Study of Türkiye

Selçuk CANTÜRK - Fahri Alp ERDOĞAN - Murat SAĞBAŞ

5.8 GHz'de Havacılık Uygulamaları için Radomlu Konformal
Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Burak Can KIŞLA - Bilge ŞENEL

Cilt (Sayı) / 21 (1)

Mayıs / May 2025

ISSN : 1303-6831

ISSN (Online): 2148-1776

Savunma Bilimleri Dergisi

The Journal of Defence Sciences

Millî Savunma Üniversitesi
Alparslan Savunma Bilimleri ve
Millî Güvenlik Enstitüsü

Cilt (Sayı) / Volume (Issue): 21 (1)
Mayıs / May 2025

BASKI

Kara Harp Okulu Basımevi

YAZIŞMA VE HABERLEŞME ADRESİ

Millî Savunma Üniversitesi

Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü

Kara Harp Okulu Yerleşkesi 06654 Bakanlıklar/ANKARA/TÜRKİYE

Telefon / Phone: +90 312 417 51 90 / 4915

E-posta / E-mail: savbil@msu.edu.tr

Web: https://kho.msu.edu.tr/akademik/enstitu/enstitu_anasayfa.html

**MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ
VE MİLLÎ GÜVENLİK ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA BİLİMLERİ DERGİSİ**

**TURKISH NATIONAL DEFENCE UNIVERSITY
ALPARSLAN DEFENCE SCIENCES AND
NATIONAL SECURITY INSTITUTE
THE JOURNAL OF DEFENCE SCIENCES**

Cilt: 21 Sayı: 1 • Mayıs / May 2025 • ISSN 1303-6831 • ISSN (Online) 2148-1776

Dergi Sahibi – Baş Editör / Licensee – Editör-in-Chief

Prof. Dr. Hüsnü ÖZLÜ

Editör / Editor

Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor

Arş Gör. Dr. Elif Ece ELMAS

Alan Editörleri / Field Editors

Prof.Dr. Alpaslan ATMANLI (Millî Savunma Üniversitesi)

Prof.Dr. Baha ŞEN (Millî Savunma Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali KARA (Gazi Üniversitesi)

Prof.Dr. Ziya TELATAR (Başkent Üniversitesi)

Prof.Dr. Mustafa ALKAN (Gazi Üniversitesi)

Doç.Dr. Tuğba TABANLIGİL CALAM (Gazi Üniversitesi)

Doç.Dr. Mehmet ŞİMŞEK (Millî Savunma Üniversitesi)

Doç.Dr. Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR (Millî Savunma Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Tuğba EROĞLU AZAK (Millî Savunma Üniversitesi)

Dr.Hüseyin Alper İRTEM (Millî Savunma Üniversitesi)

Teknik Editörler

Öğr. Gör. Yunus Emre KARAKOCA

Arş.Gör. Ezel KORLAELÇİ

Mizanpaj Editörü / Layout Editor

Öğr. Gör. Orhun DÖŞ

**Türkçe Dil Editörleri/Turkish Language
Editör**

Doç.Dr. Emrah BOZOK

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Metehan ŞAHİN

**İngilizce Dil Editörleri/English
Language Editör**

Dr.Öğr.Üyesi Sinan GÜL

Öğr. Gör. Selvin KAYAHAN

Yayın Türü / Journal Type

Yaygın Süreli Yayın / Vernacular Publication

Yayın Aralığı / Publication Schedule

Altı Ayda Bir (Mayıs-Kasım) / Semi-Annually (May-November)

Taradığımız Veritabanları / Databases Indexing Our Journal

ULAKBİM TR DİZİN, EBSCO, Index Copernicus, ARASTIRMAX (Bilimsel Yayın İndeksi), SOBIAD (Fen Bilimleri).

Yayın ve Danışma Kurulu / Editorial and Advisory Board

Prof. Dr. Serdar SALMAN	Millî Savunma Üniversitesi
Prof. Dr. Nurettin ACIR	Millî Savunma Üniversitesi
Prof. Dr. Faruk UÇAR	Millî Savunma Üniversitesi
Prof. Dr. Çetin ELMAS	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ulvi ŞEKER	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ	Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Bülent BOSTAN	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ	Kırıkkale Üniversitesi
Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Alpay ÖZER	Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Semih ÖZDEN	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Faruk KILIÇ	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Ayhan AYTAÇ	Millî Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet ŞİMŞEK	Millî Savunma Üniversitesi
Dr.Öğr.Üyesi Kemal Gürol KURTAY	Millî Savunma Üniversitesi

Amaç ve Kapsam

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü tarafından hazırlanan ve 2002 yılından itibaren yayımlanan Savunma Bilimleri Dergisi, Mayıs ve Kasım aylarında olmak üzere yılda iki kez yayımlanmaktadır. Savunma Bilimleri Dergisinin amacı, savunma bilimleri alanındaki bilimsel gelişmeleri takip etmek ve bu konuda bilimsel araştırma ve uygulamalara yer vererek alana katkı sağlamaktır. Ayrıca araştırmacılar ve uygulamacılar arasındaki etkileşimi kurup destekleyerek savunma bilimlerinin gelişmesine hizmet etmektir. Dergi; savunma yönetimi, harekât araştırması, askerî elektronik sistemler, harp silah ve araçları, harp tarihi, KBRN savunma, askerî eğitim yönetimi, güvenlik araştırmaları, bilgisayar mühendisliği, istihbarat çalışmaları ve savunma bilimleri ile ilişkili diğer alanlarda nitelikli araştırmaları Türkçe ve İngilizce olarak yayımlamaktadır. Dergi; ULAKBİM TR DİZİN, EBSCO, Index Copernicus, ARASTIRMAX (Bilimsel Yayın İndeksi), SOBIAD (Fen Bilimleri) veri tabanları tarafından taranmaktadır. Dergiye gönderilecek makaleler DergiPark üzerinden kabul edilmektedir.

Makalelerdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler makale sahiplerine aittir; Millî Savunma Üniversitesi ile Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

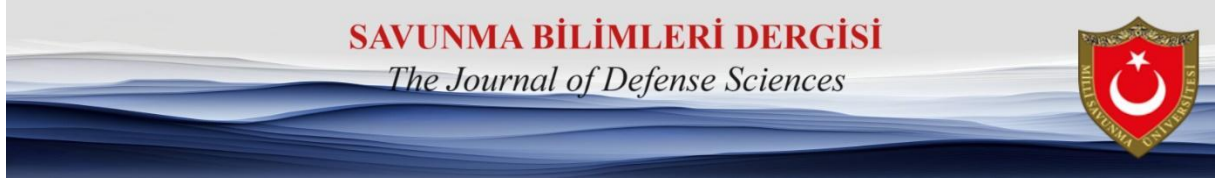
Purpose and Scope

The Journal of Defense Sciences, prepared and published by National Defence University Alparslan Defence Sciences and National Security Institute since 2002, is published semiannually in May and November. The purpose of Defence Sciences Journal is to contribute to the literature by following scientific developments in defence sciences and creating a communication environment for scientific research and applications. It also facilitates interaction between researchers and practitioners in order to achieve progress in the field. The journal contains qualified articles in both Turkish and English languages in the fields of Ballistics, Cyber Security, CBRN Defense, Weapon Systems Engineering, Electronic Warfare, Industrial Engineering, Military Electronic Systems Engineering, Civil Engineering, Aerospace Engineering, Operations Research and other fields related to defence sciences. The journal is scanned by ULAKİM TR DİZİN, EBSCO, Index Copernicus, ARASTIRMAX (Scientific Publication Index), SOBIAD (Science) databases. Manuscript to be sent to the journal are accepted through DergiPark.

The opinions, thoughts, postulations or proposals within the articles are but reflections of the authors and do not, in any way, represent those of Turkish National Defence University or of the Alparslan Defence Sciences and National Security Institute.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Güneş Enerji Potansiyeli Yüksek Bir Bölgede PVsyst Yazılımı Kullanarak PV Sistemin Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi Design and Performance Evaluation of a PV System Using PVsyst Software in a Region with High Solar Energy Potential Erşan Ömer YÜZER	1
Hava Savunma Sistemlerinin Performansının Entropi Ağırlıklı TOPSIS Yöntemi İle Değerlendirilmesi Evaluation of the Performance of Air Defense Systems Using the Entropy Weighted TOPSIS Method Ayşe EDİZ - Şenol ALTAN - Salih TAŞDEMİR	13
Comparative Investigation of Triboelectric Energy Harvesting Modes: A Simulation Study Triboelektrik Enerji Hasat Modlarının Karşılaştırmalı İncelenmesi: Bir Simülasyon Çalışması Ali Ekber ÖZDEMİR - Sibel AKKAYA OY	33
k Grup Regresyon Modelinin Eşitliği için Kullanılan Testlerinin Karşılaştırılması Comparison of Tests for Equality of the k Group Regression Model Faik Ümit DİRİ - Fikri GÖKPINAR - Esra GÖKPINAR	43
Kömür Kullanımı ile Üretilen Enerji Miktarının Yapay Sinir Ağı Modeliyle Tahmini: Çin Üzerine Örnek Uygulama Estimation of the Amount of Energy Produced by Coal Use With Artificial Neural Network Model: Example Application on China Mehmet Hürşut GÜVEN - Faruk KILIÇ - Faik Ümit DİRİ	57
Metal İşleme Sektöründe Endüstri 4.0 Olgunluk Modeli Uygulaması ve Değerlendirilmesi Implementation and Evaluation of Industry 4.0 Maturity Model in the Metal Processing Industry Sultan GÜL ÖZDAMAR - Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR - Süleyman ERSÖZ	73
Examining the Factors Driving Military Innovation Using the Fuzzy DEMATEL Method: A Case Study of Türkiye Bulanık DEMATEL Yöntemi Kullanılarak Askeri İnovasyona Yön Veren Faktörlerin İncelenmesi: Türkiye'de Bir Vaka Çalışması Selçuk CANTÜRK - Fahri Alp ERDOĞAN - Murat SAĞBAŞ	95
5.8 GHz'de Havacılık Uygulamaları için Radomlu Konformal Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı Design of Radome-Enclosed Conformal Microstrip Patch Antenna Array for Aerospace Applications at 5.8 GHz Burak Can KIŞLA - Bilge ŞENEL	113



Güneş Enerji Potansiyeli Yüksek Bir Bölgede PVsyst Yazılımı Kullanarak PV Sistemin Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi

Design and Performance Evaluation of a PV System Using PVsyst Software in a Region with High Solar Energy Potential

Erşan Ömer YÜZER ^{1*}

¹Hakkari Üniversitesi, Çölemerik Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Hakkari, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20.09.2024
Düzeltilme: 30.09.2024
Kabul: 04.10.2024

Keywords

Photovoltaic systems
Solar energy
Performance
PVsyst software
Simulation

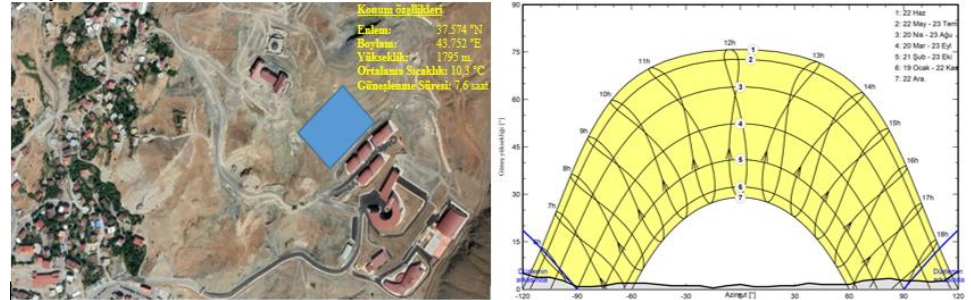
Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik sistemler
Güneş enerjisi
Performans
PVsyst yazılımı
Simülasyon

Önemli Noktalar

Güneş enerjisi, geniş kullanılabilirliği ve ölçeklenebilirlik potansiyeli nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında benzersizdir. Güneş enerjisinden güç üretmenin en popüler yolu ise PV teknolojisi veya PV sisteminin uygulanmasıdır. Bu bağlamda PV santral kurulmasının yapılacağı bölgeler için PVsyst veya diğer tasarım programları ile analizler yapılarak bölgenin performansı değerlendirilmelidir. Bu çalışmada, Hakkâri Üniversitesi Zeynelbey Yerleşkesinde belirlenen bir alanda PVsyst yazılım programı kullanılarak 1 MWp şebeke bağlantılı bir PV sistemin tasarım hususları ve sistemin tüm parametrelerine bağlı olarak performansı tartışılmaktadır.

Grafiksel Özet



Özet

Yenilenebilir Enerji'ye geçişin bir parçası olarak güneş enerjisi, sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda ülkelerin vermiş oldukları taahhütlerin arasında önemli bir paya sahiptir. Bu çalışma, güneş enerjisi üretimi ve kullanımı için oldukça yüksek bir güneş enerji potansiyeline sahip ideal bir bölge olan Hakkâri'de bir üniversite kampüsünde PVsyst yazılım programı kullanılarak 1 MWp şebekeye bağlı bir Fotovoltaik (PV) santralinin tasarım hususlarını ve performansını tartışmaktadır. Hakkâri Üniversitesi Zeynelbey Yerleşkesinde yaklaşık olarak 6000 m² alan PV yerleştirme alanı olacak şekilde tasarlanan PV sistem simülasyonunda, PVsyst yazılımı, performans oranını ve sistemde meydana gelen farklı kayıpları analiz etmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, PV sistem tarafından sağlanan enerji miktarı ile sistem kayıpları sonrasında oluşan enerji miktarını, verimliliği ve performans oranı gibi bilgileri içerir.

Abstract

As part of the transition to renewable energy, solar energy holds a significant share among the commitments made by countries toward zero-emission targets. This study discusses the design considerations and performance of a 1 MWp grid-connected photovoltaic (PV) plant on a university campus in Hakkâri, an ideal region with high solar energy potential, using PVsyst software. In the PV system simulation designed with approximately 6,000 m² of PV installation area at Hakkâri University's Zeynelbey Campus, PVsyst software was used to analyze the performance ratio and various losses occurring within the system. The simulation results include information on the energy generated by the PV system, the net energy after system losses, efficiency, and performance ratio.

*Corresponding author, e-mail: ersanomeryuzer@hakkari.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun yükseliş gösterdiği günümüzde enerjiye olan talep hızlı bir şekilde artmaktadır. Türkiye, enerji matrisindeki PV enerjisinin payını artırmak için birçok farklı bölgesinde oldukça yüksek güneş enerji potansiyele sahiptir. Öyle ki 2016 yılında 833 MW olan güneş enerji kapasitesi 2022 yılı haziran ayı itibarıyla 8.479 MW değerine ulaşmıştır. Ancak bu enerji kaynağının Türkiye enerji matrisindeki yüzdesi diğer bazı kaynaklara kıyasla hala düşük düzeyde kalmaya devam etmektedir. 2024 yılı Temmuz ayı sonu itibarıyla Ülkenin Kurulu kapasitesindeki fosil kökenli kaynakların payı %41.2, su kaynaklarının payı %28.5, güneş %15.6, rüzgâr %10.9, jeotermal %1.5 ve %2.4 ile diğer kaynaklar olarak sıralanmaktadır [1].

Güneş enerjisinden güç üretmenin en popüler yolu, PV teknolojisi veya PV sisteminin uygulanmasıdır [2, 3]. PV sistem kullanımı, Türkiye'nin birçok bölgesinde güneş ışınımının yüksek kullanılabilirliği nedeniyle alternatif enerji olarak uzun vadede oldukça karlı olacaktır. Bu nedenle Türkiye'de dâhil birçok ülke temiz enerji üretmek için güneş enerjisinden faydalanarak elektrik enerji üreten PV sistem projeleri tasarlamakta ve bu projeleri uygulamaktadır. Bu bağlamda, yeni PV sistem ile enerji üretimi büyümeye devam ederken, istikrarlı PV sistem enerji üretim çözümleri giderek daha fazla ilgi görmektedir.

PV sistemini oluşturma süreci, konum koordinatları, iklim koşulları ve güneş ışınımı vb. tarafından etkilenir. Bu nedenle PV sistem tasarımı, sistem bileşenlerini tasarlamayı, seçmeyi ve değerlendirmeyi içerir [4]. PVsyst, PVSOL, PVGIS, SOLARPRO vb. çeşitli

simülasyon programları ile başarılı PV sistem tasarımları gerçekleştirilebilir [5,6]. PVsyst, kullanımda olan en yaygın standart simülasyon yazılımlarından biri olarak kabul edilir [7,8]. Bu nedenle literatürde mevcut birçok sayıda çalışma, PVsyst'in güneş enerjisi üretimini doğru bir şekilde modellemedeki etkinliğini göstermiştir [9]. Bu bağlamda, birçok araştırmacı, dünyanın farklı bölgelerinde özellikle de sıcak iklim bölgelerinde PV sistem tasarımı ve sistemin performansını değerlendirmek için PVsyst yazılımını kullanmıştır. Bu bölgelerde yapılan çalışmalara ait literatür bilgisi aşağıdaki şekildedir.

Yadav ve ark., Hindistan'da belirledikleri bir konumun ölçülen verilerini kullanarak 1 kWp PV sistemi PVsyst yazılımı ile tasarlamış ve simüle etmiştir [10]. Ramoliya, Hindistan'da şebekeye bağlı 1 MWp PV sisteminin simülasyonunu, PVsyst bilgisayar yazılım paketi kullanarak gerçekleştirmiş ve performansını değerlendirmiştir [11]. Grover ve ark., PVsyst yazılımını kullanarak Hindistan'daki bir tesis için 20 MW'lık şebekeye bağlı PV santralin simülasyonu ve boyutlandırılması yoluyla analizini derinlemesine açıklamıştır [12]. Rachit ve Giri, Hindistan'da bir üniversite kampüsünde 500 kW şebekeye bağlı bir PV sistemi PVsyst yazılımı ile tasarlayarak simüle etmiş ve ayrıntılı sistem yapılandırması ile sistem çıkışı ve kayıpları belirlemişlerdir [13]. Siregar ve ark., Endonezya'da bir Üniversite'deki Yapay Göl üzerinde 600 m²'lik bir alanı güneş PV yerleştirme alanı olarak kullanarak tasarım optimizasyon çalışmaları ve PV sistem simülasyonu sunmuşlardır [14]. Alnoosani ve ark., Suudi Arabistan'da bir Üniversite

kampüsünde 100 MW kapasiteli bir PV şebekesine bağlı elektrik üretim sisteminin tasarımını ve simülasyonunu PVsyst yazılımı ortamında sunmuşlardır [15]. Spea ve Khattab, Mısır'daki bir dinlenme tesisi için bağımsız bir PV sistemin tasarımını PVSyst simülasyon yazılımı kullanarak gerçekleştirmiş ve performans analizini yapmışlardır [16].

Satish ve ark., Dubai için PVsyst yazılımını kullanarak, şebekeye bağlı 200 kWp'lik monokristalin silikon güneş enerjisi santralini uygulanabilirliğini incelemişlerdir [17]. Vasanthkumar ve Naganagouda, PVsyst yazılımı kullanılarak Hindistan'da bir eyalette büyük ölçekli (5 MW) şebekeye bağlı güneş PV sistemlerinin tasarımı için standart bir prosedür geliştirmişlerdir [18]. Tallab ve Malek, PVsyst bilgisayar yazılımı kullanarak Cezayir'deki bir sahadaki 1 MW PV santralin tasarımını ve performansını eğim açısına bağlı olarak incelemişlerdir [19]. Ahmed ve ark., PVsyst yazılımını kullanarak Irak'ın Bağdat kentinde 250 kW şebeke bağlantılı PV sistemin tasarımı ve performans analizini sistem kayıplarını da hesaba katarak sunmuşlardır [20]. Abbood Al-Khazzar ise Irak'ın aynı kentinde bir okulda PVsyst kullanarak 5 kW şebeke bağlantılı bir PV sistem için teorik ayrıntılı analiz yapmışlardır [21]. Faiz ve ark., Pakistan'da bir Üniversite kampüsünde PVSyst kullanarak 3 MW PV santralini modellenmesi ve analizini kayıpları ve performans oranını dahil ederek araştırmışlardır [22]. Bukya ve ark., PVsyst simülasyon yazılım platformu ile Hindistan'da bir eyalette 15,6 kW şebeke bağlantılı bir PV enerji santrali tasarlamış ve güç kayıplarını hesaplayarak performans analizi yapmışlardır [23].

Türkiye'de birçok bölge PV santral uygulamaları için uygundur. Bu bağlamda PV santral kurulumunun yapılacağı bölgeler için PVsyst veya diğer tasarım programları ile analizler yapılarak bölgenin performansı değerlendirilmelidir. Bu şekilde farklı bölgeler için yapılmış birçok literatür bilgisi bulunmaktadır. Sancar ve Bayram yaptıkları çalışmada, Isparta ili için iki farklı tasarıma ve üç farklı açığa sahip yaklaşık 5000 m² bir alana sahip bir sera güneş enerjisi santralini PVsyst yazılımı kullanarak simüle etmiştir [24]. Çınaroğlu, Kilis ilinde yer alan 1040 kWp, 1029 kWp ve 1000 kWp güce sahip üç adet güneş enerjisi santrali ile PVsyst simülasyon programında oluşturulan ve bahse konu santrallerle aynı özelliklere sahip sistemlerin analizlerini yapmıştır [25]. Haydaroğlu ve Gümüş, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde 250 kWp gücünde bir güneş enerjisi santrali kurarak PVsyst simülasyon programı ile simülasyonunu yapmıştır. Ayrıca IEC 61724 standardında belirtilen performans kriterlerine uygun olarak performansı analiz edilmiştir [26]. Akcan ve ark., Batman ilinde birbirine bağlı 30 kW PV şebekenin tam bir modellemesi ve simülasyonunu PVsyst yazılım programı kullanarak yapmış ve performans oranı ile sistemde meydana gelen farklı kayıpları analiz etmişlerdir [27]. Türkiye'de dahil olmak üzere bütün dünya ülkelerinin yenilenebilir enerji kaynakları ile şebekelerini güçlendirmeleri önemli bir konudur. Bu çalışma, Hakkari Üniversitesi Zeynelbey yerleşkesinde belirlenen yaklaşık 6000 m² alan üzerinde kurulması planlanan 1 MWp güce sahip şebeke bağlantılı PV sistem tasarımını ve simülasyon odaklı bir

değerlendirmesini içerir. PVsyst yazılımı kullanılarak simule edilen PV sistemin elde edilen sonuçları değerlendirilerek analizi gerçekleştirilmiştir. Bulgular doğrultusunda sistemde meydana gelen farklı kayıplar incelenerek performansı analiz yapılmıştır. Ek olarak, bu araştırma, güneş enerji potansiyeli yüksek olan bir bölgede geniş kapsamlı PV sistem tasarımlarının uygulanabilirliği hakkında öneriler sunmaktadır. Bunun sonucu olarak, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması yönünde optimum verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik için PV sistem projelerine rehberlik etmede doğru simülasyon tabanlı değerlendirmelerin temel rolü vurgulanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Güneş enerjisi, geniş kullanılabilirliği ve ölçeklenebilirlik potansiyeli nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında benzersizdir. PV sistemler ise güneş ışığının doğrudan güce dönüşümüne öncülük eden sistemlerdir [28]. En yaygın kullanılan PV sistemler, güvenilirlikleri ve verimlilikleri nedeniyle şebeke bağlantılı olanlardan oluşur [29]. Bu nedenle bu çalışmada Hakkâri Üniversitesi Zeynelbey Yerleşkesinde belirlenen bir alanda PVsyst yazılım programı kullanılarak 1 MWp şebeke bağlantılı bir PV sistemin tasarım hususları ve sistemin tüm parametrelerine bağlı olarak performansı tartışılmaktadır. Bu bölümde çalışmanın ana hatları ve modelleme çalışmaları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

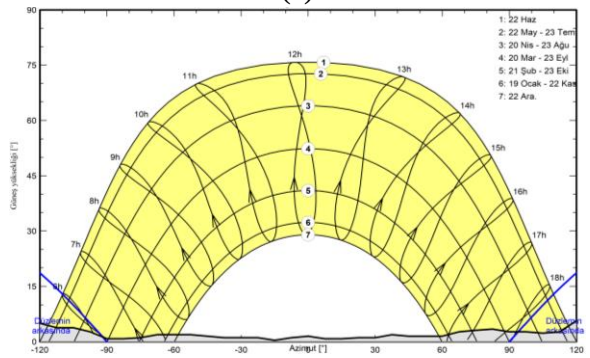
2.1. Çalışma Yeri ve Özellikleri

Yaklaşık olarak 673 dönüm toplam arazi alanına sahip Zeynelbey Yerleşkesi güney cepheye yönelen eğimli arazi yapısı nedeniyle PV

sistemlerin uygulanacağı elverişli bir bölgedir. Yerleşkede çalışma kapsamında belirlenen tasarım alanı 37.574° kuzey ve 43.752° güney enlemlerinde yer alan özellikle ilkbahar-yaz mevsimlerinde uzun saatler boyunca güneş ışınlarına maruz kaldığı için güneş enerjisi kullanımı için ideal bir yer olarak kabul edilir. Günlük ortalama güneş radyasyonu oranı metrekare başına yaklaşık 4.413 kWh.m^{-2} /gün'dür [30]. Maksimum 15.5°C , minimum 5.5°C ve ortalama 10.3°C sıcaklık değerine sahiptir. Yıllık ortalama 7.6 saat güneşlenme süresine sahip yerleşkede güneye dönük PV sistem uygulanacak oldukça fazla miktarda alan bulunmaktadır [31]. Şekil 1 (a), PV sistem simülasyonu yapılacak alan ve bu alana ait konum özelliklerini, Şekil 1 (b) ise PV sistem tasarımının yapılacağı alanda ufuk ana hatları ile yıllık güneş yörüngesinin özelliklerini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 1: (a) PV sistem tasarım yeri ve konum özellikleri (b) Güneş yörüngesinin özellikleri.

2.2. PV Sistem Tasarımı

Bu çalışmanın temel amacı, 1 MWp'lik bir PV enerji santrali kurulması için adım adım tasarım hususlarını sunmak, seçilen alanda PV sistemi analiz etmek, santralin tasarım sorunlarını ve PVsyst yazılımını kullanarak tasarlanan santralin performans analizini yapmaktır. PVsyst yazılımı güneş PV güç santralının performans parametrelerinin tasarımı ve tahmini için en yaygın kullanılan yazılımlardan biridir ve bu çalışmada yazılım tarafından kullanılan temel veritabanı Meteonorm 8.0'dan gelmektedir [32,33]. Bu veritabanı PV sistemin modellenmesi için güvenilir bilgiler sağlar. PV sistem buradan sağlanan bilgiler ile bir ışıınım modeli kullanır ve çevresel giriş verisi olarak sıcaklık ve rüzgâr hızının yanı sıra albedo ve küresel yatay ışıınım (GHI) ve dağınık ışıınım (DHI) değerine ihtiyaç duyar [34]. 15 yıllık bir süreyi kapsayan bu veriler doğrultusunda PV sistemdeki davranışlar, kayıplar, verimlilik ve performans değerlendirmesi yapılabilir [35]. Çalışmada kullanılan PVsyst giriş parametreleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1: PVsyst yazılımında kullanılan giriş parametreleri.

Parametre	Değer/Özellik
Enlem	37.574 °N
Boylam	43.752 °E
Yükseklik	1795 m.
Veri	Meteonorm 8.0 (1985-2000)
Optimum eğim açısı	34°
Azimuth	0°
Albedo	0.20°
PV sistem gücü	1 MWp
PV Modül	CW Enerji_Monokristal CWT450 - 144PM - 166
İnvertör	Huawei Technologies SUN2000-100KTL-M1-400Vac

PV sistemler aracılığıyla enerji üretiminin coğrafi ve iklimsel faktörlere bağımlılığı nedeniyle değişken olduğunu dikkate almak gerekir. PV sistem tasarımında, PV panellerinin seçimi, düzenlenmesi, yönelimi ve boyutlandırılması ile ilgili titiz değerlendirmeler yapılarak sistemin yapılandırılması sağlanır [36]. Işıınım, PV modüllerin verimliliğini büyük ölçüde etkileyen bir parametredir. Bu nedenle en iyi sonuçları elde etmek için en iyi geliş açısının ve konumunun seçimi son derece önemlidir [37]. Belirli bir konum için eğim açısı öncelikle konumun enleminden etkilense de, iklim koşulları da eğim açısının belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Yüzer ve Bozkurt bu çalışma ile aynı bölgede 37 ° eğim açısına sahip PV panel güç çıkışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir [38,39]. Ancak bu çalışma da arazi yapısının eğimi göz önünde bulundurarak 34°'lik bir PV panel açısı ile güneye doğru yönlendirilmiş bir PV sistem tasarımı yapılmıştır. Bu parametreler göz önünde bulundurularak PV sistem tasarımında PV panel ve İnvertör özelliklerinin seçilmesi ve değerlendirilmesi önemlidir. Çalışmamızda ışıınım, kirlenme, sıcaklık, kablolama, İnvertör, güç elektroniği, ara bağlantılar ve şebeke kullanılabilirliği gibi güç kayıplarını hesaba katıyoruz. Hakkari Üniversitesi Zeynelbey Yerleşkesinde belirlenen alanda tasarlanan PV sistemde yer alan PV panel ve İnvertör özellikleri Tablo 2 'de gösterilmiştir.

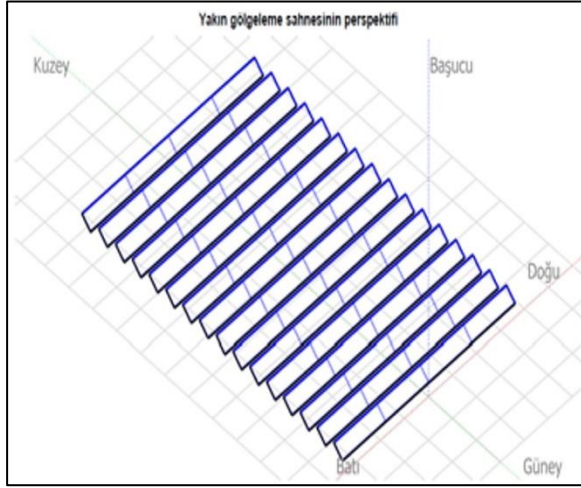
Tablo 2: PVsyst yazılımında tasarlanan sistemde PV panel ve invertör özellikleri.

PV Panel Özellikleri		İnvertör Özellikleri	
PV Panel Gücü	450 Wp	Birim Gücü	100 kWac
PV Modül Sayısı	2224	İnvertör Sayısı	9 adet
Modül	139 zincir x 16 Seri	Toplam Güç	900 kWac
P_{mpp}	912 kWp	Çalışma Gerilimi	200-1000 V
I_{mpp}	1540 A	Maksimum Güç	110 kWac
U_{mpp}	592 V	Nom. Güç Oranı	1.11
Toplam PV Gücü	1001 kWp	İnvertör Toplam Gücü	900 kWac

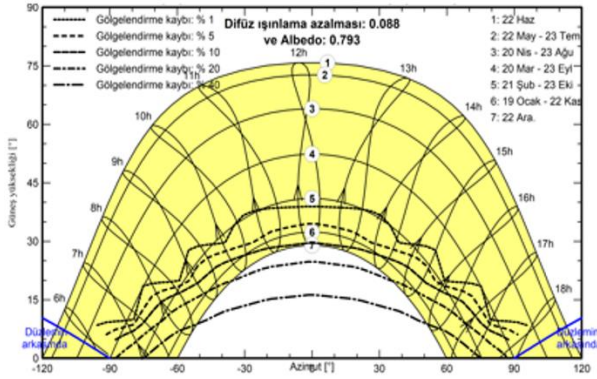
PV sistemin tasarımı için belirlenen alan veya planlanan güç hakkında bilgi, PV modülü ve İnvertör teknolojisini seçmek için önemlidir. PVsyst yazılım programı, güce, teknolojiye ve üreticiye göre birçok PV modülü ve İnvertör türü içerir [40]. Bu bağlamda PV sistem için belirlenen alan 1 MWp güç için 2224 PV modülünden, seri bağlı 16 PV modülünden ve paralel bağlı 139 diziden oluşur. PV ile birlikte çalışan ana bileşen şebekeye bağlı PV sistemindeki İnvertördür. PV sistem, 100 kW'tan oluşan 9 adet İnvertör'den oluşmakta ve İnvertörlerin 50 °C çalışma şartlarında nominal güç oranı 1.11 olarak kabul edilmektedir. Bunların yanı sıra sistem tasarımı yapılırken sistemin maksimum güç noktasının (mpp) max. ve min. değerler arasında kalacak şekilde olması sağlanmalıdır. Umpp, her zaman max. gerilimin altında kalır. Işınım seviyesinde ki artış ise daha düşük seviyelerdeki ışınlam değerine göre her modül için artan bir çıkış gücüne yol açar. Bu özelliklere bağlı olarak çeşitli kayıpların ve yakın gölgelenmelerin ayrıntıları da doğru enerji verimi için belirtilebilir.

Gölgeleme, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip kritik

bir faktördür. Güneş panellerinin üzerine düşen gölgeler, panel verimliliğini azaltabilir ve dolayısıyla enerji üretimini olumsuz yönde etkileyebilir. PVsyst benzeri tasarım yazılımları, gölgeleme analizleri yaparak, sistemde potansiyel gölgeleme kaynaklarını belirler ve bu gölgelerin panel üzerindeki etkilerini değerlendirir. Doğru bir gölgeleme analizi, güneş enerjisi sistemlerinin optimal konumlandırılması ve verimliliklerinin maksimum düzeye çıkarılması için kritiktir [41]. Modeli oluşturulan PV sistem ön yüzünde gölge oluşturacak ağaç, ev gibi nesneler bulunmadığından sadece panel diziliminden kaynaklı birbirleri üzerine gün doğum ve batışına yakın zamanlarda bir gölgelenme olacağı varsayımıyla santralin gölgeleme çizimi Şekil 2 (a)'da gösterildiği gibi yapılarak sisteme aktarılmıştır. Şekil 2 (b)'de ise PV sistem üzerinde gölgeleme etkisinin ışınlam ve kayıp faktörleri gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2: (a) PVsyst yazılımında tasarlanan PV sistemin gölgeleme sahnesinin perspektifi **(b)** Eğrisi.

Tablo 3: PVsyst yazılımında tasarlanan sistemin genel sonuçları.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR Oran
Ocak	90,0	27,53	-2,79	157,0	134,1	128,6	124,5	0,793
Şubat	99,5	30,26	-1,32	146,2	136,7	128,4	124,2	0,849
Mart	151,8	45,42	3,39	189,8	181,3	165,9	160,6	0,846
Nisan	194,9	54,28	8,51	211,8	201,7	180,7	175,0	0,826
Mayıs	228,8	59,46	13,62	219,5	207,9	182,5	176,7	0,804
Haziran	265,6	40,44	18,54	238,4	226,6	194,3	187,9	0,788
Temmuz	252,1	54,52	22,48	233,9	222,0	188,0	181,7	0,776
Ağustos	234,0	42,39	22,47	242,5	231,7	195,2	188,5	0,776
Eylül	190,8	36,62	17,61	229,4	219,8	189,5	183,1	0,798
Ekim	133,0	38,94	11,80	186,4	177,0	158,0	152,8	0,820
Kasım	92,9	28,36	4,41	153,1	135,1	125,5	121,5	0,793
Aralık	75,6	25,86	-0,52	133,1	110,2	104,9	101,5	0,762
Yıl	2008,9	484,10	9,92	2341,0	2184,1	1941,3	1877,9	0,802

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu bölüm, PV sistem tasarımı bölümünde belirtilen parametreleri göz önünde bulundurarak ve önerilen sistemi analiz ederek tasarımı simüle eder ve sonuçları üretir. PVsyst yazılımında 450 Wp Monokristal PV panel ile 100 kW birim güce sahip İnvertör kullanılarak simüle edilen 1 MWp gücünde ki PV sistemin ayrıntılı olarak incelenmesi sonucu, denge ve ana sonuçları, giriş/çıkış enerji diyagramı, normalleştirilmiş üretim, günlük çıkış enerjisi, performans oranı ve kayıp diyagramı bu bölümde tartışılmıştır.

İlk olarak yıllık küresel ışıınım ve Mateonorm'a dayalı sonuçlar, projenin simülasyonu için gerekli olan Tablo 3'te sunulmaktadır. Mateonorm değerleri önemlidir çünkü PV sistem tasarımının yapılması istenen alanda yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir husustur.

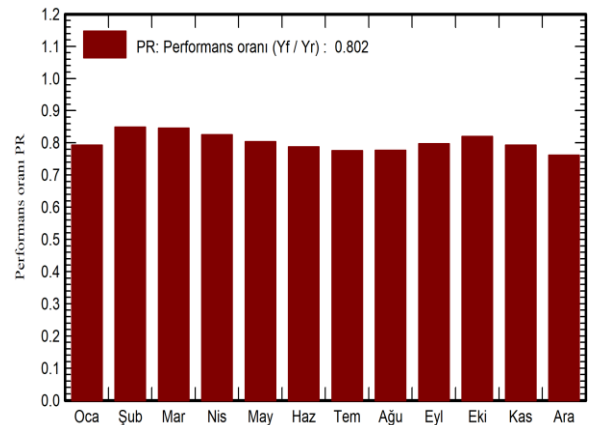
Tablo 3'te GlobHor; küresel yatay ışınlı, DiffHor; yatay difüz ışınlı, T_Amb; ortam sıcaklığını, GlobInc; kolektöre yansıyan küresel ışınlı, GlobEff; gölgeleme için düzeltilmiş etkin küresel ışınlı, EArray; dizinin çıkışındaki etkin enerjiyi, E_Grid; Şebekeye enjekte edilen enerjiyi, PR ise Performans oranını ifade etmektedir.

PVsyst yazılımı kullanılarak tasarlanan PV sistem tasarımından elde edilen ve Tablo 3'te yer alan bu sonuçlar, PV panel düzlemindeki küresel ışınlı, kirlenme kayıpları ve gölgeleme kayıpları dikkate alınarak etkili küresel ışınlı gibi değişkenleri içerir. Bu değişkenlerin dışında, PV sistem tarafından üretilen DC enerjisi, elektrik bileşenlerindeki kayıplar dikkate alınarak şebekeye enjekte edilen enerji, PV dizi ve sistem verimliliği de hesaplanır. Tablo 3'te belirtilen her değişkenin hesaplanan değerleri aylık ve yıllık değerler açısından elde edilmiştir. Değişkenlerin yıllık değerleri, aylık değerler üzerinden ortalamaları alınarak yıllık değerlere dönüştürülmüştür. Tablo 3 incelendiğinde, çalışma yeri için yatay düzlemdeki yıllık küresel ışınlı 2008,9 kWh/m² olarak hesaplanmıştır paneldeki yıllık küresel enerjisi 2341,0 kWh/m² ve kayıplardan sonra etkili küresel ışınlı ise 2184,1 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ışınlı değerine bağlı olarak tasarlanan PV dizisinden üretilen yıllık DC enerji miktarı 1941,3 MWh ve şebekeye enjekte edilen yıllık AC enerji miktarı ise 1877,9 MWh'dir.

PV dizisi tarafından üretilen enerji, şebekeye enjekte edilen enerjiyle aynı olamaz. PV dizisinden gelen enerji, şebekeyi beslemek için

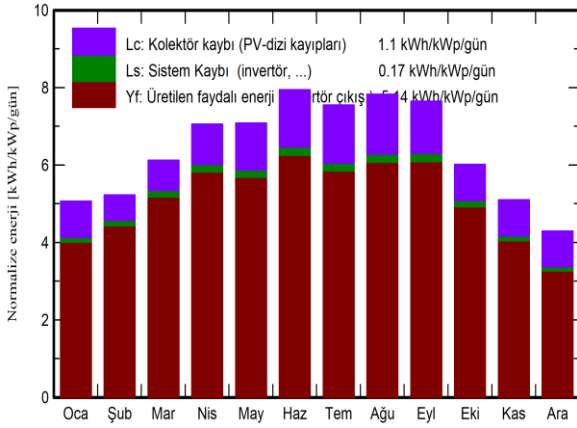
AC enerjisine dönüştürülmesi gereken DC enerjisidir. Bu sırada AC kablolama kaybı açısından bir miktar enerji kaybedilir. Tasarlanan 1 MWp PV sistem, şebekeye yıllık bazda 1877.9 MWh enerji enjekte eder. PV sistem, Ağustos ayında 188.5 MWh enerji üreterek bu ayda şebekeye daha fazla enerji enjekte etmiştir. Şebekeye enjekte edilen en düşük AC enerjisi miktarı ise Aralık ayında 101.5 MWh olarak gerçekleşmiştir.

Performans oranı, bir PV santralının kalitesini ölçen bir kalite faktörüdür. PV santralının teorik ve gerçek enerji çıktıları arasındaki ilişkiyi tanımlar. PR, enerji tüketimi ve kayıpların düşülmesinden sonraki enerjiyi gösterir. Genellikle, çalışma sırasında kaçınılmaz kayıplar nedeniyle Performans oranı %80 civarındadır. PR %80'e ne kadar yakınsa, sistem o kadar etkili ve verimli olacaktır [15]. Tasarımı yapılan 1 MWp gücündeki PV sistemde yıllık ortalama performans oranının (PR) %80.2 olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 3 incelendiğinde, PR değerinin aylık bazda küçük değişikliklerle değiştiği görülmektedir. Monokristal PV panel kullanılan 1 MW'lık bir PV sistemin performans oranı Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3: PV sistem performans oranı grafiği.

Bu çalışmada toplam kayıplar, sistem kayıpları ve kurulu kWp/gün başına üretilen faydalı enerji gibi normalleştirilmiş üretimler simülasyon çalışmasında değerlendirilmiştir. Bu normalleştirilmiş üretimler PV sistem performansını değerlendirmek için standartlaştırılmış değişkenlerdir. PV dizisinin toplama kayıplarını, sistem kayıplarını ve inverter çıkışının üretilen faydalı enerjisini verir. Aylık üretimi ve kWh başına kayıpları açıkça gösterir. Şekil 2, PV sistemin kurulu kWp başına aylık normalleştirilmiş enerji üretim değerlerini göstermektedir.

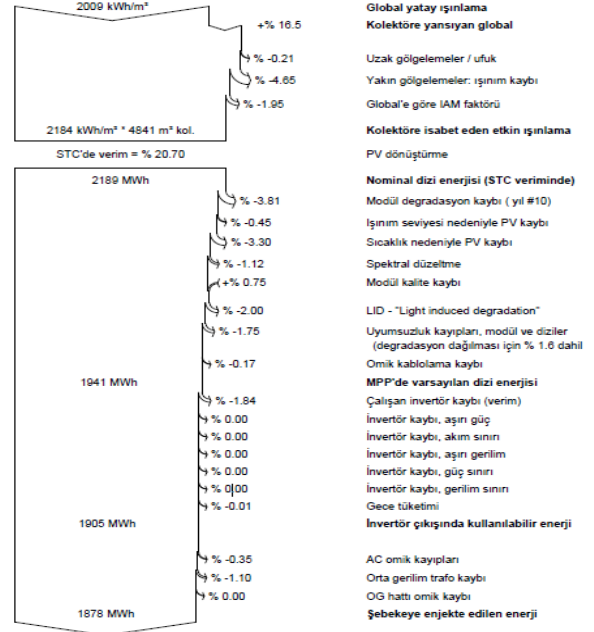


Şekil 4: PV sistemin kurulu kWp başına aylık normalleştirilmiş enerji üretimleri.

Şekil 4'de Lc; toplam kayıpları olarak ifade edilir ve tasarlanan PV sistemde 1,1 kWh/kWp/gün olarak hesaplanmıştır. Ls; sistem kaybıdır ve 0,17 kWh/kWp/gün değerindedir. Yf ise üretilen faydalı enerjiyi ifade eder ve tasarlanan sistemde 5,44 kWh/kWp/gün'dür.

Simüle edilmiş çalışmalardan elde edilen kayıplar diyagramı, PV santrali kurulumu sırasında karşılaşılabilecek çeşitli kayıpları veya dikkate alınması gereken kısıtlamaları analiz etmeye yardımcı olur. Bu çalışma kapsamında

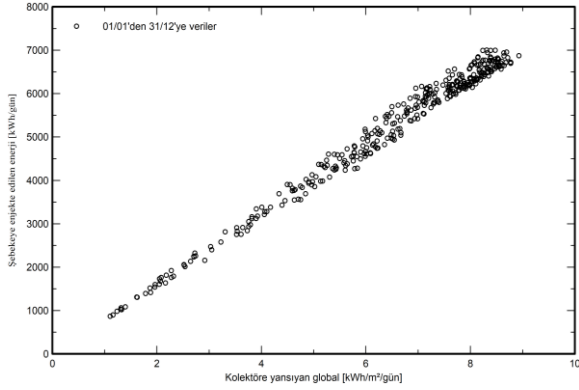
tasarlanan PV sistemdeki çeşitli kayıpları temsil eden kayıplar diyagramı Şekil 5'te görülmektedir.



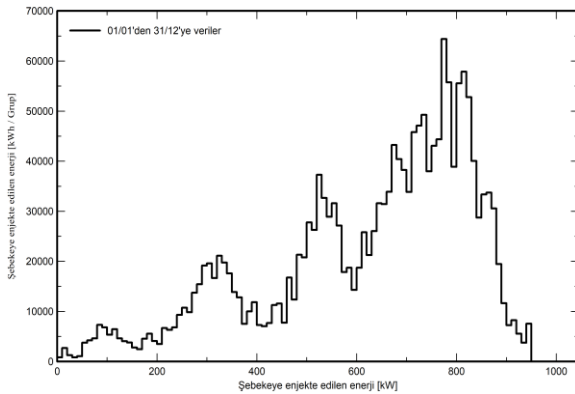
Şekil 5: PV sisteme ait yıllık kayıplar diyagramı.

Şekil 5'te gösterilen kayıplar diyagramına göre tasarlanan PV sistemin yatay düzlemindeki küresel ışınlam değeri 2009 kWh/m² olduğu görülmektedir. Ancak panel yüzeyindeki etkin ışınlam 2184 kWh/m²'dir. Bu, ışınlam seviyesi nedeniyle enerji kaybına, yani %0,45'lik bir kayba neden olur. Bu etkin ışınlam bir PV modül veya dizinin yüzeyine düştüğünde elektrik veya elektrik enerjisi üretilir. PV dönüşümünden sonra, standart test koşullarında (STC) dizi nominal enerjisi 2189 MWh'dir. Standart test koşulları (STC) altında PV dizisinin verimliliği %20,70'dır. MPP'deki yıllık dizi enerjisi 1941 MWh'dir. Bu aşamada oluşan çeşitli kayıplar şunlardır: %3,3 sıcaklık nedeniyle kayıplar, %0,75 PV modülün bozulması nedeniyle kayıplar, %1,75 modül dizisi uyumsuzluğu nedeniyle kayıplar ve %0,17 Omik kablolama kayıplarıdır. İnverter çıkış tesisinde yıllık bazda kullanılabilir enerji 1905 MWh olup burada

oluşan %0,35 AC omik kayıpları ve %1,10 OG trafo kaybı nedeniyle şebekeye enjekte edilen enerji miktarı 1878 MWh'dir. Bu bağlamda tasarlanan PV sistemde şebekeye enjekte edilen enerji miktarına ait dağılım grafikleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6: PV sistemde panellere yansıyan küresel ışınımına göre şebekeye enjekte edilen enerji miktarı.



Şekil 7: PV sistemde şebekeye enjekte edilen yıllık enerji miktarı.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gelişen güneş teknolojilerinin gerçek dünya verimliliği üzerindeki etkisinin araştırılması çok önemli olacaktır. PVsyst yazılımını kullanan bu araştırma, 1 MW elektrik üretimi için Hakkari ilinde oldukça verimli bir alandaki PV sistemin gölgeleme etkisini de göz önünde bulundurularak performans oranı, verimlilik, yıllık üretim ve santraldeki güç kayıplarının etkisi hakkında derinlemesine bir araştırmayı analiz etmektedir.

PV sistemin performansı yıllık bazda gözlemlenmiş ve simüle edilen ortalama performans oranı %80,15 olarak elde edilmiştir. Bu değer esas olarak PV sistemin verimli ve etkili olduğunu gösterir. PV sistemin şebekeye verdiği toplam enerji miktarı 1877,9 MWh'dir. Analiz sonuçlarına göre sistemin 188,5 MWh'lik maksimum enerji çıkışı Ağustos ayında ve minimum enerji çıkışı ise Aralık ayında 101,5 MWh olarak gözlemlenmiştir. Bu değerler PV hücrelerin çalışma sıcaklığının bir sonucudur. Bu bağlamda PV modüllerin verimliliğinin güneş ışınımına göre sıcaklığa daha duyarlı olduğu gözlemlendi. Sonuçlar, bu simüle edilmiş PV sistem planının kurulumunun, operasyonel avantajları nedeniyle verimli ve başarılı olacağını göstermektedir. Şebeke bağlantılı tasarlanan PV sistemin gerçek değerler ile projelendirmek için ilerleyen zamanlarda PVsyst simülasyonlarının doğruluğunu iletirmek ve çeşitli iklim koşulları altında güneş PV sistemi performansı için modelleri iyileştirmek gerekir.

YAZAR KATKILARI

Erşan Ömer YÜZER: Literatür araştırması, kavramsal tasarım, metodoloji, simülasyon, görselleştirme, yazma, gözden geçirme ve düzenleme.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

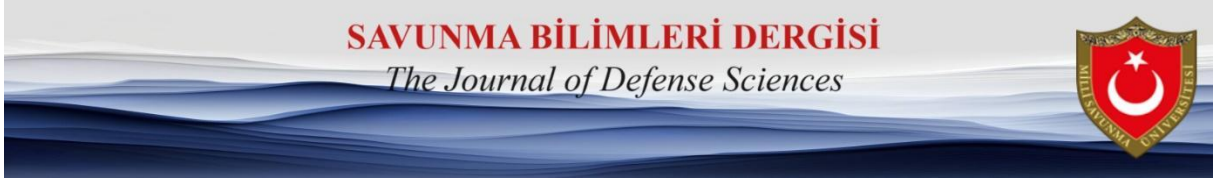
Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://enerji.gov.tr>, (10.09.2024).
- [2] Sharma, S., Kurian, C. P., & Paragond, L. S., "Solar PV system design using PVsyst: a case study of an academic Institute," *In 2018 international conference on control, power, communication and computing technologies (ICCPCT)*, 123-128, 2018. doi: 10.1109/ICCPCT.2018.8574334.

- [3] Baqir, M., & Channi, H. K., "Analysis and design of solar PV system using PVsyst software," *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, 1332-1338, 2022. doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.029.
- [4] Spea, S. R., & Khattab, H. A., "Design sizing and performance analysis of stand-alone PV system using PVsyst software for a location in Egypt," *In 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 927-932, 2019. doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008058
- [5] Kumar, R., Rajoria, C. S., Sharma, A., & Suhag, S., "Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, 5322-5328, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.785.
- [6] Mohammadi, S. A. D., & Gezezin, C., "Design and simulation of grid-connected solar PV system using PVsyst, PVGIS and HOMER software," *International Journal of Pioneering Technology and Engineering*, vol. 1, no. 01, 36-41, 2022. doi: 10.56158/jpte.2022.24.1.01.
- [7] Shrivastava, A., Sharma, R., Saxena, M. K., Shanmugasundaram, V., & Rinawa, M. L., "Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone PV system using PVsyst," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, 3385-3392, 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.258.
- [8] Kumar, N. M., Kumar, M. R., Rejoice, P. R., & Mathew, M., "Performance analysis of 100 kWp grid connected Si-poly photovoltaic system using PVsyst simulation tool," *Energy Procedia*, vol. 117, 180-189, 2017. doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.121.
- [9] Mishra, P. R., Rathore, S., & Jain, V., "PVSyst enabled real time evaluation of grid connected solar photovoltaic system," *International Journal of Information Technology*, vol. 16, no. 2, 745-752, 2024. doi: 10.1007/s41870-023-01677-x.
- [10] Yadav, P., Kumar, N., & Chandel, S. S., "Simulation and performance analysis of a 1 kWp photovoltaic system using PVsyst," *In 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 0358-0363, 2015. doi: 10.1109/ICCPEIC.2015.7259481
- [11] Ramoliya, J. V., "Performance evaluation of grid-connected solar photovoltaic plant using PVsyst software," *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, vol. 2, no. 2, 7, 2015.
- [12] Grover, A., Khosla, A., & Joshi, D., "Design and simulation of 20MW photovoltaic power plant using PVsyst," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 1 58-65, 2020. doi: 10.11591/ijeecs.v19.i1.
- [13] Rachit, S., & Giri, V. K., "Design of grid connected PV system using PVsyst," *i-Manager's Journal on Electrical Engineering*, vol. 10, 14-18, 2016.
- [14] Siregar, Y., & Hutahuruk, Y., "Optimization design and simulating solar PV system using PVsyst software," *In 2020 4rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, 219-223, 2020. doi: 10.1109/ELTICOM50775.2020.9230474.
- [15] Alnoosani, A., Oreijah, M., Alhazmi, M., Samkari, Y., & Fagha, H., "Design of 100 MW solar pv on-grid connected power plant using (PVsyst) in umm al-qura university," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 8, no. 11, 356-363, 2019. doi: 10.21275/30101901.
- [16] Spea, S. R., & Khattab, H. A., "Design sizing and performance analysis of stand-alone PV system using PVsyst software for a location in Egypt," *In 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 927-932, 2019. doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008058.
- [17] Satish, M., Santhosh, S., & Yadav, A., "Simulation of a Dubai based 200 KW power plant using PVsyst Software," *In 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 824-827, 2020. doi: 10.1109/SPIN48934.2020.9071135.
- [18] Vasanthkumar, D. S., & Naganagouda, D. H., "Design and development of 5MW solar PV grid connected power plant using PVsyst," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, no. 8, 778-785, 2017.
- [19] Tallab, R., & Malek, A., "Predict system efficiency of 1 MWc photovoltaic power plant interconnected to the distribution network using PVsyst software," *In 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1-4, 2015. doi: 10.1109/IRSEC.2015.7454973.
- [20] Ahmed, O. A., Habeeb, W. H., Mahmood, D. Y., Jalal, K. A., & Sayed, H. K., "Design and performance analysis of 250 kW grid-connected photovoltaic system in iraqi environment using PVsyst software," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)*, vol. 7, no. 3, 415-421, 2019. doi: 10.52549/ijeei.v7i3.978.
- [21] Abboud Al-Khazzar, A. A., "A Theoretical Detailed Analysis for a Proposed 5kW PV Grid-Connected System Installed in Iraq Using PVsyst Tool," *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 9, no. 2, 105-113, 2018. doi: 10.5829/ijee.2018.09.02.05.

- [22] Faiz, F. U. H., Shakoor, R., Raheem, A., Umer, F., Rasheed, N., & Farhan, M., "Modeling and analysis of 3 MW solar photovoltaic plant using PVsyst at Islamia University of Bahawalpur, Pakistan," *International Journal of Photoenergy*, vol. 1, 2021. doi: 10.1155/2021/6673448.
- [23] Bukya, M., Kumar, P., & Kumar, R., "On-Grid Solar Photovoltaic Power Plant Analysis Under PVsyst Simulation Software Platform," *In Flexible Electronics for Electric Vehicles: Select Proceedings of FlexEV—2021*, 419-425, doi: 10.1007/978-981-19-0588-9_41.
- [24] Sancar, M. R., & Bayram, A. B., "Modeling and Economic Analysis of Greenhouse Top Solar Power Plant with PVsyst Software," *International Journal of Engineering and Innovative Research*, vol. 5, no. 1, 48-59, 2023. doi: 10.47933/ijeir.1209362.
- [25] Çınaroğlu, M. S., "Şebekeye Bağlı Üç Adet Fotovoltaik Enerji Santralinin PVsyst Programı İle Analizi; Kilis Örneği," *El-Cezeri*, vol. 8, no. 2, 675-687, 2021. doi: 10.31202/ecjse.865649.
- [26] Haydaroğlu, C., & Gümüş, B., "Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralinin PVsyst ile simülasyonu ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 7, no. 3, 491-500, 2016.
- [27] Akcan, E., Kuncan, M., & Minaz, M. R., "PVsyst yazılımı ile 30 kw şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin modellenmesi ve simülasyonu," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 18, 248-261, 2020. doi: 10.31590/ejosat.685909.
- [28] Nallamothe, B. K., Janga, R., & Pendem, S. R., "Design and Analysis of Grid Connected Solar PV System Using PVsyst Software," *In 2024 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 1-6, 2024. doi: 10.1109/SCES61914.2024.10652298.
- [29] Chauhan, A., Sharma, M., & Baghel, S., "Designing and performance analysis of 15 kWp grid connection photovoltaic system using PVsyst software," *In 2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 1003-1008, 2020. doi: 10.1109/ICIRCA48905.2020.9183386.
- [30] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://gepa.enerji.gov.tr>, (12.09.2024).
- [31] Turkish State Meteorological Service, <https://mgm.gov.tr/eng/forecast-cities.aspx>, (20.08.2024).
- [32] Longares, J. M., García-Jiménez, A., & García-Polanco, N., "Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparison," *Solar Energy*, vol. 257, 155-163, 2023. doi: 10.1016/j.solener.2023.04.005.
- [33] Viana, Z. C., dos Santos Costa, J., Silva, J. V., & Fernandes, R. M., "Accuracy Analysis of Pvsyst Software for Estimating the Generation of a Photovoltaic System at the Polo de Inovação Campos dos Goytacazes," *In 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA)*, 1-6, 2020. doi: 10.1109/TDLA47668.2020.9326203.
- [34] Nussbaumer, H., Janssen, G., Berrian, D., Wittmer, B., Klenk, M., Baumann, T., & Mermoud, A., "Accuracy of simulated data for bifacial systems with varying tilt angles and share of diffuse radiation," *Solar Energy*, vol. 197, 6-21, 2020. doi: 10.1016/j.solener.2019.12.071.
- [35] Abo-Zahhad, E. M., Rashwan, A., Salameh, T., Hamid, A. K., Faragalla, A., El-Dein, A. Z., ... & Abdelhameed, E. H., "Evaluation of solar PV-based microgrids viability utilizing single and multi-criteria decision analysis," *Renewable Energy*, vol. 221, 2024. doi: 10.1016/j.renene.2023.119713.
- [36] Balal, A., & Giesselmann, M., "PV to vehicle, PV to grid, vehicle to grid, and grid to vehicle micro grid system using level three charging station," *In 2022 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 25-30, 2022. doi: 10.1109/GreenTech52845.2022.9772041.
- [37] Denoix, T., Sechilariu, M., & Locment, F., "Experimental comparison of photovoltaic panel operating cell temperature models," *In IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2089-2095, 2014. doi: 10.1109/IECON.2014.7048790.
- [38] Yuzer, E.O., & Bozkurt, A., "Comparison of Mathematical Calculation and Measurement Results for Solar Irradiance on Inclined and Flat Surfaces in Photovoltaic Systems," *6. International Palandoken Scientific Studies Congress*, 185-195, 2023.
- [39] Yuzer, E.O., "Investigation of Power Generation Behaviors of Solar Power Plants under Fluctuating Irradiation Values," *10th International Conference on Applied Sciences*, 1307-1316, 2023.
- [40] Abdeen, O., Mourad, M., & Salim, H., "A comparison study of PV (5MW) based on PVsyst program for evaluation productive energy to connect with the grid. Sudan case study," *In 2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA)*, 1-6, 2019. doi: 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182520.
- [41] Şahin, Z. R., "Gerçekten Sanala: 1 MWp Güneş Santralinin PVsyst Simülasyon Programıyla Performans Analizi," *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 11, no. 23, 10-11, 2024. doi: 10.54365/adyumbd.1471211.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Hava Savunma Sistemlerinin Performansının Entropi Ağırlıklı TOPSIS Yöntemi İle Değerlendirilmesi

Evaluation of the Performance of Air Defense Systems Using the Entropy Weighted TOPSIS Method

Ayşe EDİZ¹ Şenol ALTAN^{1*} Salih TAŞDEMİR^{1,2}

¹Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ekonometri Bölümü, Ankara, ,Türkiye

²Hava Kuvvetler Komutanlığı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14.03.2024
Düzeltilme: 10.09.2024
Kabul: 13.11.2024

Keywords

Air Defense Systems,
Performance Criteria,
Air Defense Systems
Feature,
Entropy,
TOPSIS

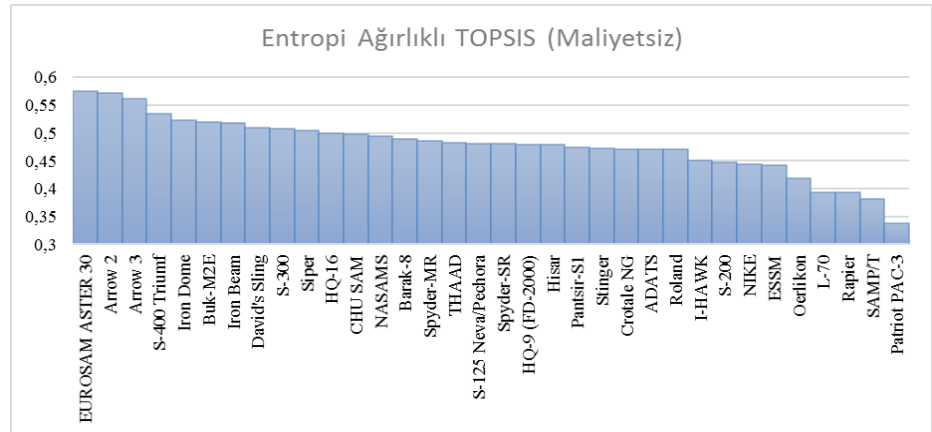
Anahtar Kelimeler

Hava Savunma Sistemleri
Performans Kriterleri,
Hava Savunma Sistemleri
Özellikleri,
Entropi,
TOPSIS

Önemli Noktalar

İlk on sıralamada yer alan Türkiye menşeli Siper ve Hisar hava savunma sistemleri, hava savunma alanında öncü olan İsrail, Rusya, ABD, Çin gibi ülkelerin ürettiği sistemler arasında iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Bu sistemlerin harekât alanında etkinliği kanıtlandığında ve seri üretim ile maliyeti azaldığında performansının daha da artması yanında Türkiye'nin hava savunma alanında dışa bağımlılığını azaltması da muhtemeldir.

Grafiksel Özet



Özet

Etkili bir hava savunma sisteminin performansı ise birçok kritere bağlıdır. Bu çalışmada bir hava savunma sistemi üzerinde etkili olan kriterler dikkate alınarak karar verme problemi matematiksel olarak çözülmüştür. Dünya savunma sektörü piyasasında bulunan hava savunma sistemlerinden verilerine ulaşılabilen 34 sistem, çalışmanın alternatiflerini oluşturmuştur. Modelin kriterleri ise dört ana başlık altında ele alınmıştır. Radar faktörü altında 3, füze ve mermi grubu faktörü altında 3, maliyet faktörü altında 2 ve son olarak lojistik faktörü altında 2 olmak üzere toplam 10 kriter performans değerlendirmesi için kullanılmış ve bu değerlendirme TOPSIS yöntemi ile yapılmıştır. Her bir kriterin performans üzerindeki önem düzeyi Entropi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Abstract

The performance of an effective air defense system is contingent upon numerous criteria. This study addresses the decision-making problem by mathematically solving the criteria influencing an air defense system's effectiveness. Data from 34 air defense systems available in the global defense sector market form the alternatives for this study. The criteria of the model are categorized into four main headings. Under the radar factor, three criteria are considered; under the missile and projectile group factor, three criteria are taken into account; under the cost factor, two criteria are considered; and finally, under the logistics factor, two criteria are included. In total, 10 criteria are utilized for performance evaluation, and this assessment is conducted using the TOPSIS method. The significance level of each criterion on performance is determined using the Entropy method.

*Corresponding author, e-mail: senol.altan@hbu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişten günümüze yeryüzündeki tüm devletlerin en öncelikli konularından birisi ülke savunması olmuştur. Bir ülkenin savunması ne kadar güçlü ise dışarıdan gelecek her türlü tehdide karşı coğrafi ve siyasi varlıklarını sürdürmeleri de o kadar güçlü olacaktır. Bu tehditlere karşı ülkeler iki türlü önlem almaktadır. Bunlardan ilki siyasi ilişkiler olup uluslararası diplomasi ve hukuk aracılığıyla ülke güvenliğini sağlamak, diğeri ise siyasi yolla çözüm bulunamadığında askeri yollara başvurmaktır. Ülke güvenliğinin ve çıkarlarının askeri yollar ile sağlanması ihtimaline karşın her ülke, diğer ülkelerin askeri güçlerini de dikkate alarak sahip olduğu askeri güçlerini geliştirmeye ve günün şartlarına uygun teknolojik değişimlerle güçlü bir savunma sistemi kurmaya yönelmişlerdir. Ülkenin dışarıdan gelecek her türlü tehdide karşı savunmasında belirleyici rol oynayan savunma sanayii ne kadar güçlü ise ülkenin uluslararası arenada belirleyici rolü de o kadar yüksek olacaktır.

Güçlü bir ülke savunmasında kara, deniz ve hava hâkimiyetinin eş zamanlı olarak sağlanması gerekmektedir. Bu savunmada hava hâkimiyetinin diğerlerine göre öneminin daha büyük olduğu, öne sürülen tezlerden biridir [1]. Bu tezde iyi bir hava savunma sisteminin kara ve deniz hâkimiyetini de içerdiği ve hava savunmasının harekât ve erişim kabiliyetinin kara ve deniz savunmasına göre daha hızlı, kolay ve esnek olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca hava savunmasında kullanılan uçak ve füze teknolojilerindeki gelişmeler savunma sistemlerinin önemini ve performansını günümüzde çok daha fazla arttırmıştır. Böylece

hava savunma sistemleri dünya genelinde ülkelerin güvenliğinin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Hava savunma sistemleri bir ülkenin ve dost unsurların bulunduğu hava sahasını dışarıdan gelecek tüm tehditlere karşı gözetlemesini, korumasını ve savunmasını sağlayan bir yapıyı ifade etmektedir. Bu yapı ne kadar güçlü ise ülkenin savunma gücü ve var olan tehdidi fiili bir çatışmaya girmeden caydırma becerisi de o kadar yüksek olacaktır. Bu ihtiyaçlara cevap verecek iyi bir hava savunma sisteminin seçilip ülke savunmasında kullanılması ise önemli bir karar verme sürecidir. Bu karar verilirken farklı analizler yapılmaktadır. Bu analizlere karşılaştırmalı, stratejik planlama, operasyonel, teknolojik ilerleme, ulusal güvenlik ve tehdit, pazar araştırması ve eğitim/personel analizleri örnek verilebilir. Tüm bu analiz türleri, işin uzmanları tarafından kişisel uzmanlık ve kişisel deneyimlere dayanılarak yapılmaktadır. Bu tür değerlendirilmelerde yanlışlık ve hata payı olma olasılığı yanında karar verme süreci de uzayabilmektedir. Böyle bir değerlendirmeyi yansız ve en az hata ile ayrıca daha kısa zamanda yapmanın bir yolu matematiksel modellerden yararlanmaktır. Bir hava savunma sistemine karar verilirken birçok faktör eş zamanlı olarak değerlendirilmeye tabi tutulmaktadır. Bu faktörlerin sisteme etkisinin önem derecesi ise hedeflenen amaca göre farklılık gösterebilmektedir. Çok kriterli karar verme modelleri (ÇKKV) ise böyle bir yapının matematiksel olarak incelenmesine olanak veren modellerdir.

ÇKKV modelleri birden fazla kriterin olduğu durumda tüm bu kriterlerin en iyilendiği çözüm kümeleri içinden en iyi alternatifin seçilme

işlemidir. Literatürde kullanılan birçok ÇKKV modeli bulunmaktadır. Bu modellerden hangisinin kullanılacağına ise problemin yapısına ve özelliklerine göre karar verilmektedir. ÇKKV modellerinden biri olan TOPSIS modelinde alternatiflerin hem en iyi hem de en kötü yönleri hesaba katılarak, karar vericilerin farklı kriterlere göre değerlendirilen alternatifler arasından bir seçim veya sıralama yapmasına olanak verilir.

Hava savunma sistemlerinin bir bütün olarak değerlendirilmesinde sistemi etkileyen birçok kriter göz önünde bulundurularak hangi sistemin kullanılmasına ya da satın alınmasına karar verilmektedir. Karar verme süreci matematiksel olarak ÇKKV süreciyle paralellik göstermektedir. Bu nedenle hava savunma sistemlerinin performansını değerlendirmek için ÇKKV modeli kullanılmıştır. Bu modellerden biri olan TOPSIS modeli ise alternatiflerin pozitif ve negatif yönlerini de hesaplamaya dahil ettiği için tercih edilmiştir. Bunun yanında her bir kriterin hava savunma sisteminin performansına etkisi eşit olmamaktadır. Bu etkilerin hesaplanmasında iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki uzman görüşüne başvurmaktır. Diğer ise kriter ağırlıklarının matematiksel olarak hesaplanmasıdır. Uzman görüşü kişiye, ülkeye, bilgi seviyesine, coğrafi şartlara, tehdit beklentisine, önceliklere vb. etmenlere bağlı değiştiği için değişiklik gösterebilmektedir. Fakat matematiksel olarak sayısal veriler kullanılarak yapılan hesaplamada böyle bir değişiklik söz konusu değildir. Bu nedenle kriterlerin ağırlıklarının hesaplanmasında Entropi yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş, hava savunma sistemleri ve amaçları

bahsedilerek iyi bir hava savunma sistemi seçiminde dikkate alınan faktörler belirlenerek dünya genelinde piyasaya sürülen 34 hava savunma sisteminin performans değerlendirmesi TOPSIS modeli ve Entropi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı rekabetçi unsur halinde olan hava savunma sistemlerini birçok faktörün dikkate alınarak değerlendirmesini, etkinlik sıralamasını yapmak, savunma planlama faaliyetleri açısından tedarik edilecek sistem etkinliğini tespit ederek karar vericilere yol göstermek, hava taarruz planlayıcıları açısından hava savunma sistemlerin etkinliği açısından farkındalık sağlamaktır. Bu hava savunma sistemleri modelin alternatiflerini oluştururken sistemin performansı üzerinde etkili olan unsurlar ise modelin kriterlerini oluşturmuştur. Bu kriterler; radar, füze/mermi grubu, mali ve lojistik faktörler olmak üzere dört başlık altında tanımlanmıştır. Radar grubu altında radar menzili, aynı anda angaje edilebilir hedef sayısı ile teknolojik ve yazılım gelişmişliği/elektronik harp dayanıklılığı kriterleri alınırken, füze/mermi grubunda etkili menzil, irtifa ve hedefleri vurma başarısı kriterleri bulunmaktadır. Mali faktör başlığı altında maliyet ve bir adet sistem için gerekli insan gücü sayısı kriterler olarak belirlenmiştir. Son olarak lojistik faktör grubu altında alınan kriterler ise yeniden mevzilenme süresi ile diğer sistemlerle entegrasyon/lojistik ve bakım kolaylığıdır. Öncelikle eşit ağırlıklı yaklaşımla problem çözülmüştür. Daha sonra tüm bu kriterlerin hava savunma sistemi üzerindeki önem derecesini belirlemek için Entropi yöntemi kullanılarak kriter ağırlıklandırılması yapılmıştır. Ülke savunmasında nokta veya bölge savunmasının etkinliğinin daha önemli olduğu

durumda maliyet göz ardı edilebilmektedir. Bu nedenle maliyet kriteri modelde iki türlü kullanılmıştır. İlk modelde maliyet kriteri yer alırken, ikinci modelde maliyet kriteri dikkate alınmamıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE RESEARCH)

Hava savunma sistemlerinin performans değerlendirmesinin matematiksel modeller aracılığı ile yapılması amacına yönelik literatürde ulusal ve uluslararası yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Burada, Türkiye’de çok kriterli karar verme teknikleri kullanılarak yapılmış temel çalışmalar verilmiştir. Hava savunma sistemi piyasasında çok sayıda sistem olmasına karşın Türkiye’de yapılan bu çalışmalar genel olarak incelendiğinde bu sistemlerin çok azının modeller çerçevesinde incelendiği görülmektedir. Bunun yanında hava savunma sistemlerinin performansı üzerinde etkili olan her bir kriterin modele dahil edilmesi modelin çözüm sonuçlarının daha güvenilir olmasına yol açacaktır. Bu kriterlerin sayısal verilerine ulaşmak her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda kullanılan kriterler ve bu kriterlerin sayıları farklılık göstermektedir.

Dört hava savunma sistemi, menzil, basitlik, dayanıklılık, birlikte çalışabilirlik, ergonomi, geliştirilebilir yeteneği, ağırlığı, bakım kolaylığı, yedek parça temin kolaylığı kriterleri olmak üzere dokuz kriter baz alınarak AHP yöntemi ile değerlendirilmiş ayrıca nokta hava savunması için hedef programlama modeli kullanılarak hangi sistemden ne kadar adet gerekli olduğuna çözüm aranmıştır [2].

Kalite, maliyet, tedarik süresi, insan gücü, teknoloji kriterleri olmak üzere beş kriter temel

alınarak bu kriterler AHP ile ağırlıklandırılmış, bulanık mantık ve hedef programlama modeli ile problem çözümü yapılmıştır [3].

Beş hava savunma sistemi, maliyet, menzil, irtifa, maksimum hız, füze ağırlığı, radar menzili kriterleri temel olarak alınmış olup AHP ile kriter ağırlıklandırılması yapılarak TOPSIS, Ağırlıklı Çarpım, ELECTRE yöntemleri ile hava savunma sistemi seçim işlemi yapılmıştır [4].

Dört hava savunma sisteminin, füze menzili/irtifası, teknoloji paylaşımı, füze etkinliği, Milli/NATO sistemlerine uyumluluk, radar kapsama alanı ve teknolojisi, maliyet, reaksiyon zamanı, atıma hazır füze sayısı, aynı anda angaje olunan hedef sayısı kriterleri temel alınarak sistemlerin performansı araştırılmıştır. Kriter ağırlıklandırmaları AHP ile yapılmış sistemlerin performans sıralaması ise TOPSIS ile yapılmıştır [5].

Hava savunma sistemlerini genel olarak nokta hava savunma sistemleri, orta menzilli bölge hava savunma sistemleri ve uzun menzilli bölge hava savunma sistemleri olarak tanımlamış ve hava savunma sistemlerinin konuşlanması için genetik algoritma kullanarak bir algoritma geliştirilmiştir [6].

Nokta ve bölge savunması için doğrusal olmayan programlama modeli ile iki farklı yöntem sunarak karşılıklı destek mesafesi modeli önermiştir [7].

Hava savunma sistemlerinin tarihsel gelişimi ve dünyadaki bazı hava savunma sistemlerinin özellikleri sözel olarak anlatılmıştır [8].

Bu çalışmada olabildiğince fazla sayıda kriter dikkate alınmış, kişisel görüşlere göre değişebilecek ağırlıklandırma metodu

kullanılmamış ve çok fazla sayıda ve kullanımda olan hava savunma sistemlerinin performans ölçümü yapılmıştır.

3. HAVA SAVUNMA SİSTEMLERİ VE AMAÇLARI (AIR DEFENSE SYSTEMS AND THEIR PURPOSE)

Hava savunma sistemleri; bir ülkenin kendi hava sahası ve dost unsurların bulunduğu hava sahasını dışarıdan gelecek tüm tehditlere karşı koruma ve gözetleme, savunma, caydırma ve hava üstünlüğü sağlama amacına hizmet eden bir yapıyı ifade etmektedir. Bu yapılanmada koruma ve gözetleme amacıyla hava sahası yılın her günü yirmi dört saat takip edilerek hava sahası kontrol edilmektedir. Savunma amacında ise kriz ve savaş durumlarında dışarıdan gelen hava saldırılarının bertaraf edilerek, kritik tesis, alt yapı, ülke sınırlarının ve toplumun korunması hedeflenmektedir. Caydırıcılık amacına yönelik olarak da olası bir düşman saldırısı karşısında bu saldırıyı güçleştirme, yavaşlatma, yıpratma ve dost unsurların daha az kuvvetle görev yapabilme avantajını sağlamak amaçlanmaktadır. Son olarak hava üstünlüğüne katkıda bulunmada ise düşman unsurların hava üstünlüğünü engellemek ve dost unsurların hava hakimiyetinin sağlanması hedeflenmektedir.

Hava savunması kara ve deniz savunmasına göre hareket kabiliyeti açısından daha esnek bir yapıdadır. Çünkü hava savunmasının karadan ve denizden hareket etme olanağı varken aynı zamanda havadan da hem karaya hem de denize erişebilme kolaylığı vardır. Ayrıca askeri alanda kullanılan uçak ve füze teknolojisinin gelişimi ile hava savunma sistemlerinin teknolojik performansları da artmıştır. Bunlar ise hava

savunmasının ülke savunmasındaki yerini ve önemini gittikçe artırmıştır. Bu haliyle bir ülkenin sahip olduğu iyi bir hava savunma sistemi dost olmayan tüm diğer ülkeler için önemli bir tehdit ve caydırıcılık unsuru haline gelmiştir. Bunun bir sonucu olarak ülkeler dışarıdan gelecek olası bir tehdiye karşı daha hızlı, etkin, yıpratıcı ve caydırıcı bir önlem almak amacıyla ya kendi sahip oldukları hava savunma sistemlerini geliştirme ya da yeni hava savunma sistemlerini satın alma yoluna giderek her türlü tehdidi bertaraf etme gayretine düşmüşlerdir [9].

4. İYİ BİR HAVA SAVUNMA SİSTEMİ SEÇİMİNDE DİKKATE ALINAN TEMEL FAKTÖRLER (KEY FACTORS CONSIDERED IN SELECTING A GOOD AIR DEFENCE SYSTEM)

Bir hava savunma sistemini üstün kılan temel faktörlerden biri sistemin sahip olduğu özellikler ve diğeri ise sistemden istenilen beklentilere cevap vermesidir. Sistemin sahip olduğu özelliklerden bir kısmının etkisinin en üst düzeyde olması beklenirken bir kısmının ise daha az etkili olması beklenir. Bu faktörlerin hepsinin eş zamanlı sağlanması sistemin hem maliyetini artıracak hem de zaman alacaktır. Bunların yanında sistemi satan ve sistemi alan ülkeler arası ikili anlaşmaların seyri de sistemin tedariği üzerinde etkilidir. Tüm hava savunma sistemlerine ilişkin literatür tarandığında ve bu konuda uzman görüşleri araştırıldığında bir hava savunma sisteminin sahip olması gereken temel özellikler dört başlık altında toplanabilir. Bunlar; radar, füze/mermi gurubu, mali ve lojistik faktörleridir. Bu temel faktörler ve bu faktörlerin altındaki alt faktörler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Hava savunma sistem seçimine etki eden temel faktörler.

Radar Faktörü	Füze veya Mermi Grubu Faktörü	Mali Faktör	Lojistik Faktör
Radar Menzili	Etkili Menzil	Maliyet	Yeniden Mevzilenme Süresi
Aynı Anda Angaje Edilebilir Hedef Sayısı	İrtifa	Bir Sistem İçin Gerekli İnsan gücü	Diğer Sistemlerle Entegrasyon/ Lojistik ve Bakım Kolaylığı
Teknolojik ve Yazılım Gelişmişliği/ Elektronik Harp Dayanıklılığı	Hedefleri Vurma Başarısı		Kullanım Kolaylığı
Radar Hedef Takip Menzili	Üretim Yılı		Geliştirilebilme Yeteneği
Aynı Anda Takip Edilebilen Hedef Sayısı	Füze/Mühimmatın Ömrü		Teslim Süresi
	Atıma Hazır Füze/Mermi Sayısı		Reaksiyon Süresi

Kaynak: Bu sınıflama araştırmacı tarafından literatür taramasına dayanılarak yapılmıştır.

4.1. Hava Savunma Sisteminde Radar Faktörü

Bir hava savunma sisteminde radar, hava sahasındaki her türlü hava unsurunun tespit, teşhis ve takip edilmesi olanağını sağlamaktadır. İyi bir radar kabiliyetinde “Radar Menzili”, aynı anda angaje edilebilen hedef sayısı, teknolojik ve yazılım gelişmişliği ile harp dayanıklılığı, radar hedef takip menzili, aynı anda takip edilebilen hedef sayısı önemli değişkenler olarak ortaya çıkmaktadır. Radar menzili değişkeni, sistemin hava sahasını ne kadar etkili bir şekilde izleyebildiğini belirlemektedir ve bu değişkenin etkisinin en yüksek düzeyde olması beklenmektedir. “Aynı Anda Angaje Edilebilen Hedef Sayısı”, sistemin eş zamanlı olarak karşıdan gelen çok sayıda tehdidi bertaraf etmesi yanında daha az sayıda hava savunma sistemi veya hava aracı ihtiyacı ortaya çıkarması nedeniyle kuvvet tasarrufu sağlaması açısından önemli katkı sağlamaktadır ve bu değişkenin sistem üzerindeki etkisinin en büyük olması beklenmektedir. Teknolojik ve Yazılım Gelişmişlik/Elektronik Harp Dayanıklılığı” ise radarın yazılım gelişmişliğini ve üstünlüğünü göstermektedir. Üretim yılı ile doğru orantılı olduğu varsayılmıştır. Bu üstünlüğün mümkün

olduğunca en üst seviyede olması beklenmektedir. Radar faktöründe etkili olan diğer bir değişken ise “Radar Hedef Takip Menzili” olup, sistem radarının hedefi otomatik takip edebileceği mesafeyi ifade eder. İyi bir radar da bu değişkenin etkisinin yüksek olması beklenmektedir. “Aynı Anda Takip Edilebilen Hedef Sayısı” ise radarın kaç hedefi birden otomatik olarak takip edebildiğini ifade etmekte ve bu takip sayısının fazla olması beklenmektedir [10].

4.2. Hava Savunma Sisteminde Füze/Mermi Grubu Faktörü

Hava savunma sisteminin esas vurucu unsuru olan füze, vuruş hassasiyeti yüksek, karmaşık ve ileri bir teknolojiye sahip olan bir silahtır. Füze sistemlerinde füzenin hızı ve yakıt kapasitesine bağlı uçuş süresi füzenin etkili menzilini belirleyen en önemli etmenlerdir. Vuruş hassasiyetini etkileyen temel unsurlardan biri arayıcı başlık kabiliyetidir. Mermi ise düşük menzillerdeki hedeflere çoklu atım imkânı sağlayan mühimattır. Mermi atım hızı ve radara bağlantılı olup olmaması merminin menzilini belirleyen temel unsurlardır. Bunun yanında merminin tekrar doldurma süresi, şarjör

kapasitesi de vuruş kabiliyetini etkileyen önemli bir konudur.

Füze ve mermi grubu faktörü altında yer alan etkili menzil, irtifa, hedefleri vurma başarısı, sistemin üretim yılı, füze/mühimmatın ömrü ve atıma hazır füze/mermi sayısı sahip olunan hava savunma sisteminin performansında önemli değişkenlerdir. Bu değişkenlerden etkili menzil, hava savunma sisteminde füzesinin hangi mesafede hedeflere karşı etkili bir koruma sağladığını göstermektedir. Bu korumada etkili menzili belirleyen füzenin uçuş süresi, yakıt kabiliyeti, arayıcı başlık kabiliyeti, fırlatma hızı, fırlatma açısı, füze ağırlığı, gövde yapısı, mühimmatın yaşı gibi etmenler önemli yere sahiptir. Bu alt kriterler etkili menzil değerinin oluşmasındaki temel unsurlardır. İyi bir hava savunma sisteminde etkili menzil değişkeninin etkisinin en yüksek düzeyde olması beklenmektedir. İrtifa, hedeflere karşı savunmanın hangi yüksekliğe kadar yapılabileceğini belirlemekte olup, çok yüksek irtifalardan gelen hedefleri önleme kabiliyetini ölçmektedir. İrtifa değişkeninin etkisi ne kadar yüksekse sistem de o kadar iyi çalışacaktır. Hedefleri vurma başarısında ele alınan hava savunma sisteminin ne tür hedeflere karşı başarı sağladığı esas belirleyici unsur olmaktadır ve başarının en büyük olması beklenmektedir. Hedefleri vurma başarısının ölçümünde ne tür hedeflere karşı başarı sağladığı esas belirleyici unsurdur. Bu hedeflerde; uçaklar, helikopterler, dron ve İHA'lar, seyir füzeleri, hava-yer mühimmatları, roket vb. yer-yer mühimmatları, balistik füzeler yer almaktadır. Bu hedeflerin ağırlıkları uzman görüşleri ile puanlanmaktadır.

Üretim yılı değişkeni sistemin aktif olarak kullanılmaya başladığı yılı ifade etmektedir. Sistemin yeni teknolojileri içerisinde barındırması açısından yaşının küçük olması istenen bir durumdur. Füze/mühimmatın ömrü sistemin ne kadar süre etkisini koruyabildiğini göstermektedir. Bu sürenin mümkün olduğunca uzun bir zaman olması istenen bir durumdur. Atıma hazır füze/mermi sayısı ise lançer ve şarjörün ne kadar mühimmat taşıyabildiğini ifade etmektedir. Bu değişkene ait kapasitenin tekrar doldurma ve yüklemeye gerek kalmayacak miktarda fazla olması beklenmektedir [5].

4.3. Hava Savunma Sisteminde Mali Faktörler

Mali faktör başlığı altında yer alan sistemin maliyeti ve sistemde görev alacak personel sayısı önemli değişkenlerdir. Maliyet değişkeni, hava savunma sisteminin satın alınmasından kurulumuna kadar olan tüm sürecin mali boyutunu ifade etmektedir ve amaç en yüksek performanslı sistemi en az maliyetle satın almaktır. Diğer bir mali konu ise sistem için gerekli insan gücüdür. Bu insan gücünün eğitimi ve sayısı maliyet üzerinde etkili olacaktır. Bu değişkenin mümkün olduğunca en düşük olması beklenir. Sistemde çalışacak insan sayısının azlığı aynı zamanda sistemde kullanım ve kontrol kolaylığı da sağlayacaktır.

Milli çıkarın getirisi maliyetten daha yüksek ise bu durumda maliyet değişkeni dikkate alınmayabilmektedir [11].

4.4. Hava Savunma Sisteminde Lojistik Faktörler

Lojistik faktörler altında yeniden mevzilenme süresi, diğer sistemler ile entegrasyon/lojistik ve bakım kolaylığı, kullanım kolaylığı,

geliştirilebilme yeteneği, teslim süresi ve reaksiyon süresi alt değişkenlerdir. Bunlardan yeniden mevzilenme süresi/yeteneği; sistemin esnekliğini, hareket kabiliyetini ve yer değiştirme hızını ölçmektedir. Hava savunma sisteminde herhangi bir atış yapıldığında sistemin yerinin tespiti daha kolay olacağından dolayı sistemin vurulmaması açısından sistemin yerinin değiştirilmesi çok önemlidir. İyi bir hava savunma sisteminde bu yer değiştirme süresinin mümkün olduğunca en kısa sürede olması beklenmektedir. Diğer sistemlerle entegrasyon/lojistik ve bakım kolaylığında ise sistemin diğer sistemler ile birlikte çalışabilir ve komuta kontrol kabiliyetinin operasyonel sürdürülebilir olması gerekir. Bu sürdürülebilirlik ne kadar yüksek ve az risk barındırıyor ise sistemin performansı da o kadar yüksek olacaktır. Bu kriter, geliştirilebilme yeteneğini de içinde barındırmaktadır. NATO sistemleri ile uyum ve üretici ülke ile ikili ilişkiler üzerinden değerlendirme yapılarak puan verilmiştir. Bu hedeflerin ağırlıkları uzman görüşleri ile puanlanmaktadır.

Lojistik faktörde etkili bir diğer değişken ise sistemin kullanım kolaylığıdır. Bu değişken ekran modüllerinin sade olmasını, az kişi ile kullanılabilirliğini ifade etmektedir. Geliştirilebilme yeteneğinde sistemin yazılım ve teknolojik gelişime imkân tanıyıp tanımadığına bakılmaktadır. İyi bir sistemde bu imkânın en yüksek olması beklenmektedir. Teslim süresi ise sistemin envantere alınabileceği zamanı ifade eder, ayrıca bu zamanın en kısa zamanda olması hedeflenir. Reaksiyon süresi ise envanterdeki sistemin atışa hazır hale getirilme süresini ifade

etmektedir. Bu sürenin en az olması, istenen bir durumdur [2].

5. HAVA SAVUNMA SİSTEMİ TEDARİKİ İÇİN YAPILAN ANALİZLER (ANALYSIS FOR AIR DEFENSE SYSTEM SUPPLY)

Ülke savunmasında çok önemli yere sahip olan hava savunma sistemlerinin tedariki kıt olan kaynakların etkin kullanılması açısından önemlidir. Bu nedenle bu sistemlerden hangi sistemin ve miktarının ne olacağına karar verilirken farklı analizler yapılmaktadır. Bu analizler temel olarak karşılaştırmalı, stratejik planlama, operasyonel, teknolojik ilerleme, ulusal güvenlik ve tehdit, pazar araştırması ve eğitim/personel analizi şeklinde sınıflandırılabilir [12].

Karşılaştırmalı Analizler: Bu analiz türünde öncelikle bir hava savunma sisteminin etkinliğini belirleyen radar menzili, füze menzili, satın alınması planlanan ülke ile ikili ilişkiler vb. gibi kriterlerin karşılaştırılması yapılmakta ve bu karşılaştırmada en çok üstünlük sağlayan savunma sistemine karar verilmektedir [6].

Stratejik Planlama Analizleri: Bu analiz türünde öncelikle askeri strateji belirlenir ve bu stratejiye hizmet edecek stratejik hedefler belirlenerek hava savunma sistemi buna göre tedarik edilmektedir [13].

Operasyonel Analizler: Tehdit gelmesi muhtemel ülkeler ile ikili güç karşılaştırmaları bu analiz türünde temel alınmaktadır. Karmaşık simülasyon modelleri kullanılıp elde edilen sonuçlara göre etkinliği fazla olan hava savunma sisteminin tedarikine ve miktarına karar verilmektedir [14].

Teknolojik İlerleme Analizi: Hava savunma sistemlerinin sahip olduğu teknolojik yeteneklerini geliştirebilme durumlarının göz önüne alındığı analiz türüdür [38].

Ulusal Güvenlik ve Tehdit Analizi: Bu analiz türünde tehdit unsuru yüksek olan ülkeler analizin temelini oluşturmaktadır. Ülkenin kendi askeri kapasitesi ile tehdit oluşturan ülkelerin askeri kapasitelerinin kayıp/kazanç durumuna göre sisteme karar verilmektedir [15].

Pazar Araştırması Analizi: Bu analiz türünde sistem tamamen ekonomik boyutu ile ele alınıp değerlendirilmektedir [16].

Eğitim/Personel Analizi: Bu analiz türünde sistemin çalışması için gerekli kalifiye insan gücü ve bunların eğitimi için gerekli olan temel faktörlere göre sistem değerlendirilmektedir.

6. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

6.1. Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, sayısal olarak ifade edilebilen ya da edilemeyen birden fazla kriterin bir bütün halinde değerlendirilmesine olanak sağlayan analitik yöntemlerdir.

Çok kriterli karar verme süreçleri, literatürde çeşitli yöntemlerle ele alınmaktadır. Çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanırken literatürde ağırlıkların bilinmediği durumlarda sıralama üstünlük yöntemlerinden Borda Metodu [17], Condorcet Metodu [18], Basic Lexicographic Methodu [19] gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Ağırlıkların belirlendiği durumda ise sıralama veya seçim işlemlerine yönelik olarak TOPSIS [20], ELECTRE [21], PROMETHE [22],

Permütasyon [23], DEMATEL [24], MAUT [25] yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir.

Hesaplama yapılabilmesi için gerekli kriter ağırlıklarını belirleme yöntemleri de önemli bir rol oynamaktadır. Kriter ağırlıkları belirleme yöntemleri olarak; Basit Kardinal Yöntem [26], AHP Yöntemi [27], Critic Yöntemi [28], Entropi Yöntemi [29] gibi yöntemler en çok kullanılan yöntemlerdir.

Ağırlıkların belirlendiği durumlarda, elde edilen ağırlıkların karşılaştırılması da önemlidir. Elde edilen ağırlıkların karşılaştırılması için ise Kullback-Leiber Uzaklığı ve Ortalama Mutlak Hata Yöntemleri [30] kullanılmaktadır.

6.2. Entropi Yöntemi

Çok kriterli karar verme yöntemlerinde kullanılan kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden birisi olan Entropi yöntemi Shannon Entropisi olarak da anılmaktadır. Bu yöntem, bilgiyle ilgili olarak kullanıldığında belirsizliğin düzeyini belirlemektedir [31]. Bu haliyle bilginin boyutu ve kalitesi açısından bir ölçüt olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinde ağırlıkların objektif hesaplanması için kullanılan bir yöntemdir. Bir kriter için hesaplanan entropi değerinin büyük olması, alternatifler arasındaki farkların küçük olmasından kaynaklanır ve bu kriterin karar için az bilgi sağladığını belirtir. Dolayısıyla entropi ağırlığı değerlerinin düşük olması beklenir [32].

Entropi yönteminin uygulanma adımları aşağıdaki gibi verilebilir [33].

Adım 1: Karar Matrisinin (A) Oluşturulması:

Karar matrisi, satırlarında performansları sıralanmak istenen karar birimleri, sütunlarında ise karar vermede kullanılacak değerlendirme

kriterlerinin yer aldığı bir matristir. A matrisi karar verici tarafından oluşturulan başlangıç matrisi olup, şu şekilde gösterilebilir:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (1)$$

Adım 2: Normalize Karar Matrisi (R):

Kriterlerin farklı ölçümleri arasındaki farklılığın giderilebilmesi için yapılan gözlem ve değerlerin normalizasyonu için kullanılan işlem eşitlik (2)'de yer almaktadır.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i^m a_{ij}} \quad (2)$$

i : Alternatif değeri,

j : Kriter değeri,

r_{ij} : Normalize edilmiş değerler.

Adım 3: Entropi Değerlerinin Hesaplanması:

Normalizasyon işleminden sonra kriterlere ilişkin entropi değerleri eşitlik (3) ile hesaplanmaktadır.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad (3)$$

$$k = (\ln(m))^{-1}$$

k : Entropi katsayısı,

r_{ij} : Normalize edilmiş değerler,

e_j : j' nci kriterin entropi değeri.

Adım 4: Ağırlık Değerlerinin Hesaplanması:

Kriterlere ait ağırlık katsayıları aşağıda verilen eşitlik (4) yardımıyla hesaplanır.

$$w_j = \frac{(1 - e_j)}{\sum_i^m (1 - e_j)} \quad (4)$$

w_j : Ağırlık değeri,

e_j : Entropi değeri.

Yukarıda verilen işlemlerle elde edilen her bir kritere ait ağırlık katsayıları toplamı 1'e eşit olacaktır.

6.3. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS [Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution] yöntemi ilk kez [20] tarafından geliştirilen çok kriterli karar verme yöntemidir. TOPSIS yöntemi seçilen alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olması düşüncesi üzerine kurgulanmaktadır [34]. TOPSIS yöntemi sadece seçilen alternatifin pozitif ve negatif ideal çözüme uzaklıklarını değil, aynı zamanda ideal ve ideal olmayan çözümleri de vermektedir [35]. Çok farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olan TOPSIS yöntemi aşağıda verilen işlem adımlarıyla uygulanmaktadır.

Adım 1: Karar Matrisinin (A) Oluşturulması:

Karar matrisinin satırlarında karar noktaları olan alternatifler, sütunlarında ise karar vermede kullanılacak değerlendirme faktörleri (kriterler) yer almaktadır. Başlangıç matrisi olarak da bilinen karar matrisi aşağıda verilen eşitlik (5)'deki gibi gösterilebilir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (5)$$

A matrisinde " m " karar noktası sayısını, " n " ise değerlendirme faktörü sayısını ifade etmektedir.

Adım 2: Normalize Karar Matrisi (R) :

Normalize edilmiş karar matrisi için vektör normalizasyonu kullanılmaktadır. Normalize edilmiş karar matrisi aşağıda verilen eşitlik (6) ile hesaplanmaktadır.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (7)$$

Adım 3: Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi (V) :
Öncelikle değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlık değerleri ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$) belirlenir. Daha sonra ilgili w_i değeri ile R matrisinin her bir sütunundaki elemanlar soldan çarpılarak V matrisi oluşturulur.

$$v_{ij} = w_i * r_{ij} \quad (8)$$

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Adım 4: Pozitif (A^+) ve Negatif (A^-) İdeal Çözümlerin Elde Edilmesi:

Bu işlem için V matrisindeki ağırlıklandırılmış değerlendirme faktörlerinin yani sütun değerlerinin en büyükleri (ilgili değerlendirme faktörü minimizasyon yönlü ise en küçüğü) seçilir. Pozitif ideal çözüm kümesinin bulunması için aşağıdaki eşitlik (10) kullanılır.

$$A^+ = \left\{ \left(\begin{matrix} maks \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\begin{matrix} min \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in J'' \right) \right\} \quad (10)$$

eşitliğinden hesaplanacak küme;

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \text{ şeklinde gösterilir.}$$

Negatif ideal çözüm kümesi ise, V matrisindeki ağırlıklandırılmış değerlendirme faktörlerinin yani sütun değerlerinin en küçükleri (ilgili değerlendirme faktörü maksimizasyon yönlü ise en büyüğü) seçilerek oluşturulur. Negatif ideal çözüm kümesinin bulunması aşağıda verilen eşitlik (11) ile gerçekleştirilir.

$$A^- = \left\{ \left(\begin{matrix} min \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in J \right), \left(\begin{matrix} maks \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in J'' \right) \right\} \quad (11)$$

eşitliğinden hesaplanacak küme;

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \text{ şeklinde gösterilir.}$$

Burada her iki eşitlikte de kullanılan J , fayda kriterini ve J'' ise maliyet kriterini göstermektedir.

Adım 5: Alternatiflerin Pozitif ve Negatif İdeal Çözümünden Uzaklıklarının Hesaplanması:

TOPSIS yönteminde her bir karar noktasına ilişkin faktör değerinin pozitif ideal ve negatif ideal çözüm kümesinden sapmalarının bulunabilmesi için Euclidian Uzaklık Yaklaşımından yararlanılmaktadır. Buradan elde edilen karar noktaları için sapma değerleri ise pozitif ideal çözüme uzaklık (S_i^+) ve negatif ideal çözüme uzaklık (S_i^-) olarak adlandırılmaktadır. Bu uzaklıkların hesaplanmasında aşağıda verilen eşitlikler kullanılır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (12)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (13)$$

Adım 6: İdeal Çözüme Göreceli Yakınlık Değerlerinin Hesaplanması:

Her bir karar noktasının ideal çözüme göreceli yakınlığının (C_i^*) hesaplanmasında pozitif ideal ve negatif ideal çözümünden uzaklık değerlerinden yararlanılır. Bu (C_i^*) değerinin hesaplanmasında, aşağıda verilen eşitlik (14) kullanılır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (14)$$

Burada C_i^* değeri, $0 \leq C_i^* \leq 1$ aralığında değer alır ve $C_i^* = 1$ değerini alması ilgili karar noktasının pozitif ideal çözüme yani ideal

çözümüne, $C_i^* = 0$ olması ise ilgili karar noktasının negatif ideal çözüme yani ideal olmayan çözüme yaklaştığını gösterir.

7. UYGULAMA (APPLICATION)

7.1. TOPSIS Modeli ile Hava Savunma Sistemi Performansının Hesaplanması (Calculation of Air Defense System Performance with TOPSIS Model)

Dünya hava savunma sistemleri piyasasında yer alan çok sayıda sistem vardır. Bu sistemler temelde benzer işlevleri yerine getirseler de her biri farklı özelliklere sahiptir. Bir ülke bir hava savunma sistemi satın alırken hem askeri ihtiyaçları hem de zaman-maliyet analizleri yaparak kendi coğrafı, ekonomik, tehdit durumlarına en iyi cevabı veren sistemi satın alma yoluna gitmektedir. Bu çalışmada dünya genelinde en çok kullanılan ve farklı özelliklere sahip hava savunma sistemlerinin temel özellikleri dikkate alınarak evrensel bir

performans sıralaması matematiksel bir model çerçevesinde yapılmıştır. Matematiksel olarak sayısal verileri temin edilen sistemler modele dahil edilmiştir. Yine benzer şekilde sistemin performansını belirleyen kriterler için de aynı yol izlenmiş, sayısal verilerine ulaşılabilen kriterler modele dahil edilmiştir.

7.2. Modelin Alternatifleri

Dünya genelinde kullanılan pek çok hava savunma sistemi bulunmaktadır. Fakat bu sistemlerden bazılarının verileri olmadığı veya verilerine ulaşılamadığından bu çalışma kapsamı içerisinde toplam 34 hava savunma sistemi ele alınmıştır. Bu hava savunma sistemleri bu modelin alternatiflerini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamı içinde kullanılan savunma sistemlerinin isimleri, hangi ülke tarafından ne zaman üretildiğine ait bilgiler üretim yılı sırasına göre Tablo 2’de verilmiştir [8].

Tablo 2: Alternatif hava savunma sistemleri.

Sıra	Sistem Adı	Üretici Ülke/Üretim Yılı	Sıra	Sistem Adı	Üretici Ülke/Üretim Yılı
1	L-70	İsviçre-1934	18	Pantsir-S1	Rusya-2008
2	NIKE	ABD-1954	19	ADATS	Kanada/Tayland-2008
3	S-200	Rusya-1960	20	Crotale NG	Fransa-2008
4	Oerlikon	İsviçre-1960	21	EUROSAM ASTER 30	Fransa/ İtalya-2008
5	S-125 Neva/Pechora	Rusya-1961	22	THAAD	ABD-2010
6	S-300	Rusya-1980	23	Buk-M2E	Rusya-2010
7	Stinger	ABD-1987	24	SAMP/T	Fransa/ İtalya-2010
8	Roland	Fransa/Almanya-1988	25	HQ-16	Çin-2011
9	I-HAWK	ABD-1989	26	Iron Dome	İsrail-2011
10	Rapier	İngiltere-1999	27	Spyder-MR	İsrail-2014
11	Arrow 2	İsrail/ABD-2000	28	Arrow 3	İsrail/ABD-2017
12	HQ-9 (FD-2000)	Çin-2001	29	David's Sling	İsrail-2017
13	Patriot PAC-3	ABD-2002	30	Barak-8	İsrail-2017
14	ESSM	ABD-2004	31	NASAMS	ABD/ Norveç-2019
15	Spyder-SR	İsrail-2005	31	Iron Beam	İsrail-2023
16	CHU SAM	Japonya-2005	33	Siper	Türkiye-2023
17	S-400 Triumf	Rusya-2007	34	Hisar	Türkiye-2023

7.3. Modelin Kriterleri

Bir hava savunma sisteminin performansının artmasında etkili olan faktörler Tablo 1’de radar, füze/mermi grubu, mali ve lojistik başlıkları altında verilmişti. Bu faktörlerin altında yer alan değişkenler kurulacak olan modelin kriterlerini oluşturmaktadır.

Radar faktörü altında yer alan radar hedef takip menzili ve aynı anda takip edilebilen hedef sayısı çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Hedef takip mesafesinin dikkate alınmamasının nedeni aynı tür hava savunma sistemlerinde farklı radarların kullanılmasıyla elde edilecek verilerin yani o radara özgü hedef takip mesafesinin değişkenlik göstermesidir. Aynı anda takip edilebilen hedef sayısının dikkate alınmaması nedeni ise aynı anda angaje edilebilir hedef sayısı kriterinin yanında bu kriterin önemini yitirmesidir. Çünkü nihai hedef takip etmek değil, angaje olarak hedefi imha edebilmektir.

Füze/mermi grubu faktörü altında yer alan füze/mühimmatın ömrü tüm sistemlerde en az 20 yıl ile sınırlandırıldığı için çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Atıma hazır füze/mermi sayısının dikkate alınmamasının nedeni ise, her sistemde füzeleri taşıyan ve ateşleyen lançer sayısı ve dolayısıyla atıma hazır füze/mermi sayısının isteğe bağlı olarak değiştirilebilmesidir. Üretim yılı kriteri ise teknolojik ve yazılımsal gelişmişlik kriteri içerisinde dikkate alınmıştır.

Lojistik faktörler altında yer alan teslim süresi, reaksiyon süresi çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Kullanım kolaylığı ve geliştirilebilme yeteneği kriterleri ise dolaylı olarak model içerisinde kullanılmıştır. Teslim süresi değişkeni üretim bandı hızı, bekleyen müşteri ve talep sayısı, üretimin durması vb. birçok etkene bağlı olduğundan bahse konu verilere ulaşmak ve problemimizde teslim edilmiş, kullanıma verilmiş sistemlerin karşılaştırılması nedenlerinden dolayı bu değişken dikkate alınmamıştır. Reaksiyon süresi harp ve barış durumunda farklılık göstereceği için standart bir süre söz konusu değildir. Bu nedenle çalışma dışında bırakılmıştır. Kullanım kolaylığı; insan gücü sayısı değişkeni ile yakından ilişkilidir. Sistemlerin az sayıda insan ile kullanılması kullanım kolaylığı sağlamaktadır. İnsan gücü sayısı modele dahil edildiği için bu değişken göz ardı edilmiştir. Geliştirilebilme yeteneği değişkeni ise diğer sistemlerle entegrasyon/lojistik ve bakım kolaylığı değişkeni içinde yer aldığı için ayrı bir değişken olarak modele dahil edilmemiştir. Bu husus genellikle açık kodlu yazılıma sahip olması, yerli sistem olması durumunda geliştirilebilmesini sağlamaktadır. Böylece lojistik ve bakım kolaylığı da sağlanabilmektedir.

Tüm açıklamalar ışığında model kapsamında kullanılacak olan değişkenler yani modelin kriterleri ve kodları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Model kapsamında kullanılan kriterler.

Radar Faktörü	Füze veya Mermi Grubu Faktörü	Mali Faktör	Lojistik Faktör
K1 : Radar Menzili	K4 : Etkili Menzil	K7 : Maliyet	K9 : Yeniden Mevzilenme Süresi
K2 : Aynı Anda Angaje Edilebilir Hedef Sayısı	K5 : İrtifa	K8 : Bir Sistem İçin Gerekli İnsangücü	K10 : Diğer Sistemlerle Entegrasyon/ Lojistik ve Bakım Kolaylığı
K3 : Teknolojik ve Yazılım Gelişmişliği/ Elektronik Harp Dayanıklılığı	K6 : Hedefleri Vurma Başarısı		

7.4. Kriterlerin Sayısal Değerleri

Tablo 3'te verilen K1, K2, K3, K4, K5, K7, K8 ve K9 kriterlerinin sayısal verilerine farklı kaynaklar kullanılarak erişilmiştir. Bunun için her bir hava savunma sisteminin web sayfaları, üretici firmanın resmi siteleri ve ikili satın alma görüşmeleri kapsamında açık olan internet kaynakları taranmıştır.

Hava savunma sistemi hakkında temel bilgiler için [8] kitap kaynağından yararlanılmıştır.

Sayısal olarak ölçülemeyen K6 ve K10 kriterleri için 4 uzman kişinin görüşüne başvurulmuş ve bu kişilerden ilgili kriterlere önem dercesine göre sayısal değerler atamaları istenmiştir. Bu alandaki kullanıcı konumunda olan uzmanlar genel olarak bir veya birkaç sistem hakkında bilgi sahibi olduğundan, dünyadaki hava savunma alanındaki gelişmeleri takip eden ve karar verici konumunda olan çok az sayıda uzman bulunduğundan 4 kişi ile sınırlanmıştır.

K6 kriteri uçaklar, helikopterler, Dron/İHA'lar, seyir füzeleri, hava-yer mühimmatları, roket vb. yer-yer mühimmatları ve balistik füzeler şeklinde alt kriterlere ayrıştırılmıştır. Uzmanlardan her bir sistemin sahip olduğu özellikleri dikkate alarak

bu alt kriterlere toplamı 10 olacak şekilde puan atamaları istenmiştir.

K10 kriterinde ise iki alt kriter tanımlanmıştır. Bunlardan ilki sistemin NATO sistemleri ile uyumu, diğeri ise üretici ülke ile olan ilişkilerdir. Uzman kişilerden istenilen toplamı 10 olacak şekilde bu iki kritere 5 üzerinde puan vermeleri istenmiştir. Alanında uzman kişilerden alınan bu puanların aritmetik ortalaması alınarak kullanılmıştır. Model çerçevesinde kullanılan tüm hava savunma sistemleri kullanılan kriterlere ilişkin derlenen sayısal veriler Ek-1'de verilmiştir.

7.5. Entropi Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Kriter ağırlıkları iki türlü hesaplanmıştır. Milli çıkarlar açısından savunma daha öncelikli ise maliyet göz ardı edilebilmekte ve maliyet kriteri önemini yitirmektedir. Bu nedenle kriter ağırlıkları maliyetin dahil olduğu ve maliyetin dahil olmadığı duruma göre ENTROPİ yöntemi ile hesaplanmıştır.

7.5.1. Maliyetin Dikkate Alındığı Ağırlıklar

Tüm kriterlerin dikkate alınarak ENTROPİ yöntemi ile ağırlıklandırıldığı kriter ağırlıkları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4: Maliyet dahil kriter ağırlıkları.

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
Ağırlık	0,111	0,130	0,007	0,175	0,076	0,004	0,144	0,092	0,243	0,016

Tablodan da izleneceği gibi dokuzuncu kriter olan yeniden mevzilenme süresi/yeteneği (0,243) ağırlık değeri ile ilk sırada yer alırken bunu dördüncü kriter olan “etkili menzil” (0,175) ağırlık değeri izlemektedir. Performans üzerinde en az etkiye (0,004) ağırlık değeriyle altıncı kriter olan “hedefleri vurma başarısı”dır. Bunu (0,007) ağırlık değeriyle üçüncü kriter olan “teknolojik

ve yazılım gelişmişliği/ elektronik harp dayanıklılığı” kriteri izlemektedir.

7.5.2. Maliyetin Dikkate Alınmadığı Ağırlıklar

Çok özel durumlarda maliyet göz ardı edilebilmektedir. Maliyetler göz ardı edilerek kriterlerin performans üzerindeki etkisi yeniden hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5’te verilmiştir.

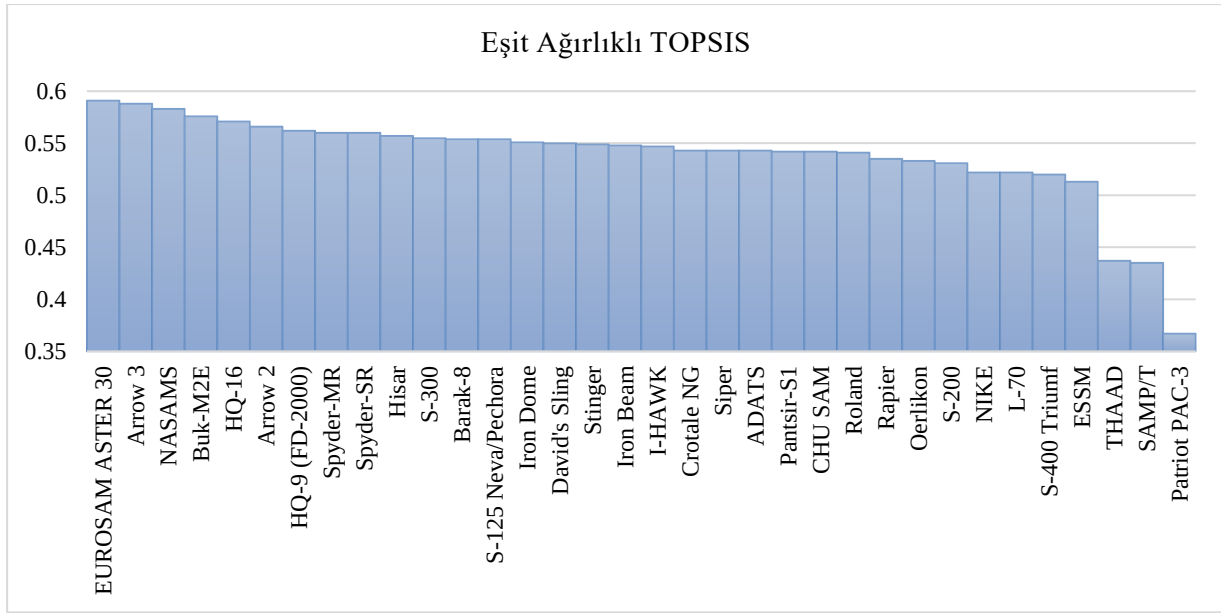
Tablo 5: Maliyetin dahil olmadığı kriter ağırlıkları.

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
Ağırlık	0,129	0,152	0,009	0,205	0,089	0,005	-	0,108	0,284	0,019

Maliyet elimine edilip ağırlıklar tekrar hesaplandığında dokuzuncu kriter olan “yeniden mevzilenme süresi” (0,284) ağırlık değeri ile ilk sırada, dördüncü kriter olan “etkili menzil” (0,205) ağırlık değeri ile ikinci sırada yer almış ve en etkili ilk iki kriter olarak belirlenmiştir. Performans üzerinde en az etkiye sahip ilk iki kriter ise (0,005) ağırlık değeri ile “hedefleri vurma başarısı” ve (0,009) ağırlık değeri ile “teknolojik ve yazılım gelişmişliği/ elektronik harp dayanıklılığı” kriterleridir.

7.5.3. TOPSIS Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması

Çalışma kapsamında ele alınan alternatif hava savunma sistemleri üç şekilde sıralamaya tabi tutulmuştur. Bunlardan ilki her bir kriterin eşit ağırlıklı olduğu durumdur. Kriterlerin ağırlıklandırıldığı durumda ise maliyet kriterinin elimine edildiği ve maliyet kriterinin dahil edildiği ağırlık değerlerine göre de iki farklı sıralama yapılmıştır. Tüm kriterlerin ağırlıklarının eşit varsayıldığı durumda hava savunma sistemlerinin performans sıralama sonuçları Şekil 1’de verilmiştir.

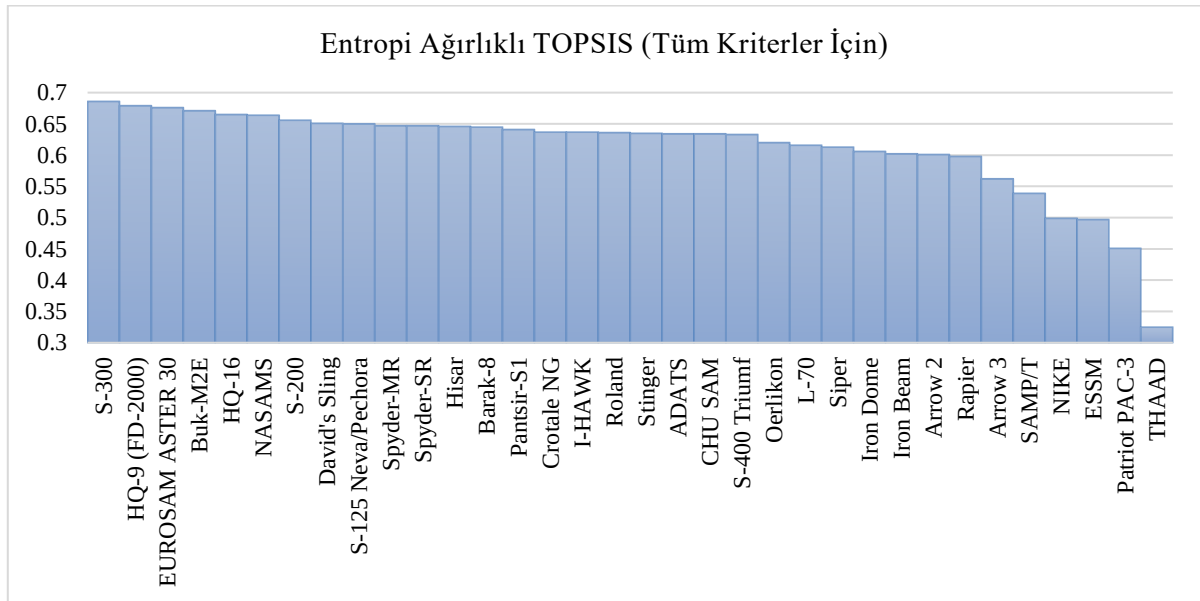


Şekil 1: Eşit ağırlıklı TOPSIS performans sıralama sonuçları.

Tüm kriterlerin eşit ağırlıklı olduğu varsayımı altında yapılan sıralamaya bakıldığında 0,591 puanla EUROSAM ASTER 30 performansı en fazla olan sistem çıkmıştır. Bunu sırasıyla Arrow 3, NASAMS, Buk-M2E, HQ-16 izlemektedir. Son sıralarda ise sırasıyla S-400, ESSM,

THAAD, SAMP/T, Patriot PAC-3 sistemleri yer almaktadır.

Tüm kriterlerin Entropi ağırlıkları kullanılarak yapılan hava savunma sistemlerinin performans sıralaması Şekil 2’de verilmiştir.

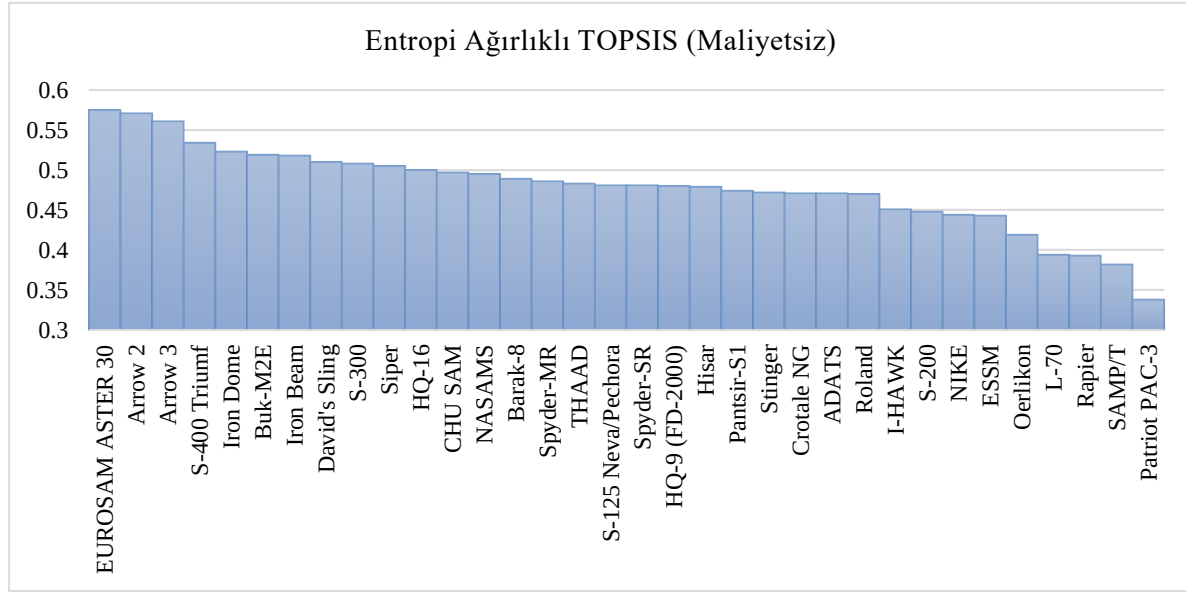


Şekil 2: Tüm kriterlerin ağırlıklandırıldığı performans sıralaması.

Tüm kriterlerin ağırlıklandırıldığı sıralamaya göre 0,686 puanla S-300 performansı en fazla olan sistem çıkmıştır. Bunu sırasıyla HQ-9 (FD-2000), EUROSAM ASTER 30, Buk-M2E ve HQ-16 sistemleri izlemektedir. Son sıralarda ise

sırasıyla SAMP/T, NIKE, ESSM, Patriot PAC-3 ve THAAD sistemleri yer almaktadır.

Maliyet kriterinin elimine edilerek diğer kriterlerin Entropi ile ağırlıklandırıldığı hava savunma sistemlerinin performans sıralaması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Maliyet kriterinin olmadığı ağırlıklı performans sıralaması.

Tablo 3'te görüldüğü gibi 0,575 puanla EUROSAM ASTER 30 performansı en fazla olan sistem çıkmıştır. Bunu sırasıyla Arrow 2, Arrow 3, S-400 Triumf ve Iron Dome izlemektedir. Son sıralarda ise sırasıyla Oerlikon, L-70, Rapier, SAMP/T ve Patriot PAC-3 yer almaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND DISCUSSION)

Hava savunma sistemleri, ulusal güvenliğin en önemli unsurlarından biridir. Güçlü bir ulusal savunma için bu alandaki tüm gelişmelerin yakından takip edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada savunma piyasasında, ülkelerin kullanımına sunulan hava savunma sistemlerinin performans değerlendirmesi matematiksel olarak yapılmış ve bu amaçla

ÇKKV yöntemlerinden biri olan TOPSIS kullanılmıştır. Matematiksel model kurgusunda sayısal verilerine ulaşılabilen 34 hava savunma sistemi modelin alternatifleri olarak alınmış ve performans değerlendirmesi için radar, füze-mermi ile mali ve lojistik faktörler başlığı altında sayısallaştırılabilen on adet kriter kullanılarak model üç farklı şekilde çözülmüştür. İlk çözümde kriterlere herhangi bir ağırlık verilmemiş tüm kriterlerin eşit ağırlıklı olduğu varsayılarak performans değerlendirilmesi yapılmıştır. İkinci çözümde tüm kriterler ENTROPİ yöntemi ile ağırlıklandırılarak sistemlerin performansına bakılmıştır. Ülke savunmasında savunmanın getireceği avantaj maliyet unsurundan daha fazla ise maliyet ne olursa olsun göz ardı

edilebilmektedir. Bu nedenle son değerlendirmede maliyet unsuru devre dışı bırakılıp yeniden ağırlıklandırma yapılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Eşit ağırlıklı performans değerlendirmesine bakıldığında EUROSAM ASTER 30, Arrow3, NASAMS, Buk-M2E, HQ-16, Arrow2, HQ-9, Spyder MR, Spyder SR ve Hisar hava savunma sistemleri ilk on sırada yer almıştır. Bu sistemlerden dört tanesi İsrail, iki tanesi Çin, bir tanesi ABD-Norveç, bir tanesi Rusya, bir tanesi Fransa-İtalya ve bir tanesi de Türkiye menşelidir. Eşit ağırlıklı sıralamada İsrail menşeli savunma sistemlerinin öne çıktığı görülmektedir.

Kriter ağırlıklandırması ile yapılan sıralamada ise S-300, HQ-9, EUROSAM ASTER30, Buk-M2E, HQ16, NASAMS, S-200, David's Sling, S-125 Neva-Pechora ve Spyder MR sistemleri performansı en yüksek ilk on sistemdir. Bu sistemlerden dört tanesi Rusya, iki tanesi Çin, bir tanesi ABD, iki tanesi İsrail ve bir tanesi ise Fransa-İtalya menşeli sistemlerdir. Rusya menşeli sistemlerin ağırlıklı sıralamada öne çıktığı görülmektedir.

Eşit ağırlıklı ve ağırlıklandırılmış sonuçlar beraber incelendiğinde altı hava savunma sistemi her iki sıralamada da ilk on sistem içerisinde yer almaktadır. Bunlar; EUROSAM ASTER 30, NASAMS, HQ-9, HQ-16, BUK-M2E, Spyder MR hava savunma sistemleridir. Bu sistemlerin iki tanesi Çin, bir tanesi İsrail, bir tanesi Rusya, bir tanesi ABD ve bir tanesi de Fransa-İtalya menşelidir. Bu değerlendirmede İsrail ve Rus menşeli sistemlerin ilk on sıra içinde öne çıktığı görülmektedir.

Maliyet kriteri göz ardı edilerek yapılan ağırlıklı sıralamada ise ilk on sırada EUROSAM ASTER 30, Arrow2, Arrow3, S-400 Triumf, Iron Dome, Buk-M2E, Iron Beam, David's Sling, S-300 ve Siper hava savunma sistemleri yer almıştır. Bu sistemlerin beş tanesi İsrail, üç tanesi Rusya, bir tanesi Türkiye ve bir tanesi de Fransa-İtalya menşelidir. Maliyet kriteri göz ardı edildiğinde İsrail sistemlerinin ağırlıklı olarak ön sıralarda yer aldığı görülmektedir.

Eşit ağırlıklı, ağırlıklandırılmış, maliyet dışı sıralamalar beraber incelendiğinde ilk on sırada ortak yer alan sistemler; Fransız-İtalyan yapımı EUROSAM ASTER 30 ve Rusya yapımı BUK-M2E hava savunma sistemidir.

Genel olarak namlulu olan Oerlikon, L-70 ve tarihsel olarak önce üretilen NİKE, ESSM, Rapier gibi sistemler her üç sıralamada da son sıralarda yer almışlardır.

İlk on sıralamada yer alan Türkiye menşeli Siper ve Hisar hava savunma sistemleri ASELSAN tarafından üretilmiş olup 2024 itibari ile kullanıma sunulmuştur. Türkiye menşeli yeni olan bu sistemlerin hava savunma alanında öncü olan İsrail, Rusya, ABD, Çin gibi ülkelerin ürettiği sistemler arasında iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Bu sistemlerin harekât alanında etkinliği kanıtlandığında ve seri üretim ile maliyeti azaldığında performansının daha da artması yanında Türkiye'nin hava savunma alanında dışa bağımlılığını azaltması da muhtemeldir.

Bu çalışma kapsamında sayısal verilerine ulaşılabilen tüm hava savunma sistemleri için çok sayıdaki kriterle değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda yeni hava savunma sistemlerinin

eklenmesi, değişen teknolojik gelişmelere ilişkin hedefleri vurma başarısı ve diğer sistemlerle entegrasyon/lojistik ve bakım kolaylığı kriterlerine ait uzman görüşleri daha geniş skalada detaylandırılabilir. Bunun yanında modelde yer alan sistemler kendi arasında silah sistemleri, namlulu sistemler, alçak irtifa füze sistemleri, uzun menzilli füze sistemleri, çok maksatlı hava savunma sistemleri gibi gruplara ayrıştırılarak her grup kendi içinde değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Ayşe EDİZ: Kavramsal tasarım, Yazma.

Şenol ALTAN: Kavramsal tasarım, Yazma, Analiz, Gözden geçirme ve Düzenleme.

Salih TAŞDEMİR: Kavramsal tasarım, Yazma, Görselleştirme, Gözden geçirme ve Düzenleme.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Douhet, G., "The Command of the Air, Washington, D.C.": Office of Air Force History, 1983.
- [2] Kabak, M., "Türk Silahlı Kuvvetlerinde Hava Savunma Silahlarının Etkinliğinin Belirlenmesi ve Hava Savunma Bataryasının Yeniden Yapılandırılması", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2001.
- [3] Aydın, Y., Eren, T., "Hava Savunma Sanayii Alt Yüklenici Seçiminde Bulanık Mantık Altında Çok Kriterli Karar Verme ve Hedef Programlama Yöntemlerinin Kullanılması", Journal of Aviation, 2(1), 10-30., 2018.

- [4] Duman, İ., "Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleriyle Hava Savunma Sistemi Seçimi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 2019.
- [5] Özcan, S., Türker, A.K., Ersöz, S., İfraz, M., Tebrizcik, S. "Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Kullanılarak Türkiye Cumhuriyeti İçin Bir Hava Savunma Sistemi Seçimi", 2. Uluslararası Malzeme Mühendisliği ve İleri İmalat Teknolojileri Kongresi (IMEAMTC'23), 2023.
- [6] Taşdemir, S., "Nokta Hava Savunma Sistemlerinin Konuş Yeri Seçimi İçin Çok Kriterli Yaklaşımlar", Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2021.
- [7] S. Taşdemir and S. Atan, "Non-linear programming model proposal for mutual support distance of air defence systems", J. Decis. Anal. Int. Comp., vol. 4, no. 1, pp. 165–175, Oct. 2024.
- [8] Tür, E., "Yerden Havaya Hava Savunma Tarihçemiz", 2022.
- [9] US Air Force, "Air Force Doctrine" Air Force Doctrine Publication 3-01, Counterair Operations, 2023.
- [10] Özyılmaz Çopur, D., "A Multicriteria Approach For Configuration And Positioning of Air Defense Systems", Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2022.
- [11] Uçakçıoğlu, B. Eren, T., "Hava Savunma Sanayisinde Yatırım Projeleri Seçiminin Çok Ölçütlü Karar Verme ve Hedef Programlama İle Seçimi", 1(2), 39-63. 2017.
- [12] Egelı, S., "Füze Tehdidi ve NATO Füze Kalkanı: Türkiye Açısından Bir Değerlendirme", Uluslararası İlişkiler, Cilt: 10, Sayı: 40, 39-73, 2014.
- [13] Petrov, Z., "Key Aspects And Analysis Of European Defense Planning Processes", IJASOS-International E-Journal of Advances in Social Sciences, Vol. V, Issue 15, 1238-1250, 2019.
- [14] Çanlı, H. ve Kandakoğlu, A. "Hava Gücü Mukayesesi İçin Bulanık AHP Modeli", Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt: 3, Sayı: 1, 71-82., 2007.
- [15] USA White House, "National Security Strategy of the United States of America" 2017.
- [16] Baran, T., "Türkiye'de Savunma Sanayi Sektörünün İncelenmesi ve Savunma Sanayi

Sektörü Harcamalarının Ekonomi Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi", Uluslararası İktisadi ve İdari Birimler Dergisi. 4 (2), 58-81., 2018.

[17] Arrow, K. J., ve Raynaud, H. "Social choice and multicriterion decision-making", MIT Press, 1986.

[18] Young, H. P., "Condorcet S Theory of Voting". American Political Science Review, vol.82, no. 4, pp. 1231–1244, 1988.

[19] Keeney, R. L., ve Raiffa, H., "Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs", John Wiley & Sons, New York sf. 77-78, Cambridge University Press. Wiley, 1976.

[20] Hwang, C. L., & Yoon, K., "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems". New York: Springer-Verlag, 129, 1981.

[21] Roy, B., "The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods, Theory and Decision", (31), ss. 49-73, 1991

[22] Brans, Jean-Pierre, "L'ingenierie de la decision: Elaboration d'instruments d'aide a la decision. La Methode PROMETHEE", Universite Laval, Colloque d'aide a la Decision, Quebec, Canada, ss.183-213, 1982.

[23] Reeves, C.R. ve Yamada, T., "Genetic Algorithms, Path Relinking and the Flowshop Sequencing Problem", Evolutionary Computation Journal, MIT, 6(1), 230–234, 1988.

[24] Huang, C.Y., Shyu, J.Z., Tzeng, G.H., "Reconfiguring the innovation policy portfolios for Taiwan's SIP Mall industry", Technovation, 27, 744–765, 2007.

[25] Wang, S.O., Wee, Y.P. & Ofori, G., DSSDSS: "A Decision Support System for Dewatering Systems Selection, Buifding and Environment", 37, 625-645, 2002.

[26] Ahn, B. S. ve Park, K. S., "Comparing methods for multiattribute decision making with ordinal weights", Computers and Operations Research, 35(5), 1660-1670, 2008.

[27] Saaty, T. L., "The Analytic Hierarchy Process". New York: McGraw-Hill, 1980.

[28] Diakoulaki, D., "Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method", Computers & Operations Research, 22 (7), 763-770., 1995.

[29] Chen, Y. Ve Deng, H., "Entropy-based methods for multi-criteria decision making. In Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium", 31-52., 2013.

[30] Şakar, C. T., "Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde Fayda Fonksiyonu Ağırlıklarının Tahmin Edilmesi için Matematiksel Model Temelli Bir Yöntem", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 23, Sayı 1, 2018.

[31] Han, B., Liu, H., and Wang, R., "Urban Ecological Security Assessment for Cities in the Beijing – Tianjin – Hebei Metropolitan Region Based on Fuzzy and Entropy Methods", Ecological Modelling, 318, 217 – 225, 2015.

[32] Wang, T. C. ve Lee, H.D., "Developing A Fuzzy TOPSIS Approach Based on Subjective Weights and Objective Weights", Expert Systems with Applications, 36(5), 8980 – 8985., 2009.

[33] Li, X., Wang, K., Liu, L., Xin, J., Yang, H. & Gao, C., "Application of the entropy weight and TOPSIS method in safety evaluation of coal mines, Procedia Engineering", 26, 2085-2091, 2011.

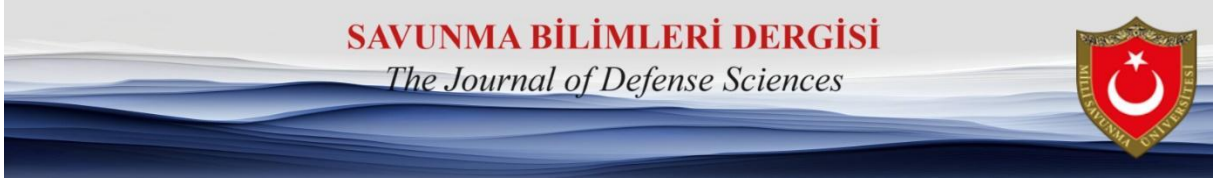
[34] Chen, C.T., "Extensions of the TOPSIS for Group Decision Making Under Fuzzy Environment", Fuzzy Sets and Systems, Volume: 114, Issue: 1, 1-9., 2000.

[35] Wang, J.W., Cheng, C.H., Cheng, H.K. "Fuzzy Hierarchical TOPSIS for Supplier Selection", Applied Soft Computing, 9, 377 – 386, 2009.

[36] Friedman, N., "The Gulf War and the New World Order". International Security, 17 (3), 5-43, 1993.

[37] Kılıç, H., "Balistik Füze 1 Dünyada Roketçiliğin Tarihsel Gelişimi ve Füze Sistemlerinin Teknik İncelenmesi", Papirüs Yayınları. 2022.

[38] J.Pike, "World Wide Missile Resources" <https://www.globalsecurity.org/>, 2023.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Comparative Investigation of Triboelectric Energy Harvesting Modes: A Simulation Study

Triboelektrik Enerji Hasat Modlarının Karşılaştırmalı İncelenmesi: Bir Simülasyon Çalışması

Ali Ekber ÖZDEMİR¹ Sibel AKKAYA OY^{1*}

¹Ordu University, Fatsa Faculty of Marine Sciences, Marine Sciences and Technology Engineering Department, Ordu, TÜRKİYE

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02.10.2024
Düzeltilme: 18.10.2024
Kabul: 21.10.2024

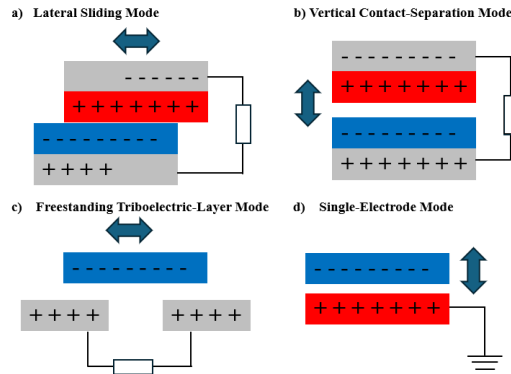
Highlights

Triboelectric energy conversion can be a promising and very inexpensive method for low-power systems. Friction between two different materials can generate free electric charges, and these electric charges can provide power for low-power systems such as wireless sensor nodes. In this paper the open and short circuit conditions of a triboelectric system for four working modes have been investigated.

Keywords

Triboelectricity
Nanogenerator
Simulation
Modelling
Renewable energy

Graphical Abstract



Anahtar Kelimeler

Triboelektrik
Nanojeneratör
Simülasyon
Modelleme
Yenilenebilir enerji

Abstract

This study presents a comparative analysis focused on simulating the operational modes of a triboelectric nanogenerator (TENG) using simulation-based method. Simulation modelling was performed using a demo version of the Comsol Multiphysics software. The simulations were conducted under both open circuit and short circuit conditions. The study provides the voltages across the surface of the electrodes under open circuit conditions and the transferred electrical charges under short circuit conditions, along with their respective graphs. The study examines the four main operating modes of a TENG—Vertical Contact-Separation Mode, Lateral Sliding Mode, Single-Electrode Mode, and Freestanding Mode—simulated under specific parameter sets. These results hold significant importance in the design stage of a Triboelectric Nanogenerator (TENG), as each working mode necessitates a specific interface circuit to harvest energy efficiently.

Özet

Bu çalışma, simülasyon tabanlı yöntem kullanılarak bir triboelektrik nanojeneratörün (TENG) çalışma modlarının simüle edilmesine odaklanan karşılaştırmalı bir analiz sunmaktadır. Simülasyon modellemesi Comsol Multiphysics yazılımının demo versiyonu kullanılarak yapıldı. Simülasyonlar hem açık devre hem de kısa devre koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma, açık devre koşulları altında elektrotların yüzeyindeki voltajları ve kısa devre koşulları altında aktarılan elektrik yüklerini ilgili grafikleriyle birlikte sağlar. Çalışma, belirli parametre setleri altında simüle edilen bir TENG'in dört ana çalışma modunu (Dikey Kontak Ayırma Modu, Yanal Kayma Modu, Tek Elektrot Modu ve Bağımsız Mod) inceliyor. Bu sonuçlar, Triboelektrik Nanojeneratörün (TENG) tasarım aşamasında büyük önem taşıyor çünkü her çalışma modu, enerjiyi verimli bir şekilde toplamak için özel bir arayüz devresi gerektiriyor.

*Corresponding author, e-mail:sibelakkaya@odu.edu.tr

1. INTRODUCTION

It is expected that the human population will reach 8.6 billion by 2030, with 61% of the population living in cities [1, 2]. This means that the energy demand of human civilization will be on the rise across all scales, spanning from nanowatts to gigawatts, driven by growing population and advancements in technology and industry. There is a correlation between energy demand and CO₂ emissions. Due to the energy demand of the population, the annual CO₂ emission rate is increasing by 2% [3]. Global warming and climate change are the biggest problems threatening humanity. To address this problem, alternative and clean energy technologies should be developed and implemented across all scales, not only at a very large scale but also at the smallest scales, within a short time frame.

Thanks to advancements in integrated circuit (IC) technologies, it has become possible to produce smarter and smaller devices that consume ultra-low energy [4]. The development of devices with ultra-low energy consumption has sparked increased interest in battery-free device technologies [5]. Main characteristics of this kinds of devices is to be needed an energy harvester which generates energy from ambience.

The operational efficacy of energy harvesters' hinges upon a multitude of variables, encompassing the energy conversion mechanism, constituent materials, operational modes, and physical dimensions of the device [6].

The design of an efficient harvester necessitates meticulous consideration of all pertinent parameters influencing its functionality.

Frequently, the optimal values for these parameters must be discerned during the design phase, as the fabrication stage typically lacks the requisite conditions for their optimization. This investigation delves into the meticulous analysis of specific parameters crucial to the performance of a triboelectric energy harvester across four main working operational modes, employing the Comsol Multiphysics software for comprehensive analysis.

The article is structured as follows: Information regarding triboelectric energy converters will be provided in the subsequent section. Following that, the performances of energy harvesters under different parameters for four distinct operating modes will be evaluated using COMSOL models.

2. TRIBOELECTRICITY

Triboelectricity is a partially novel method of energy generation intended to power ultra-low power devices, characterized by the connection and separation continuously of two dissimilar materials [7]. The mathematical background of this phenomenon can be explained by Maxwell's equations, which can be found in more detail in [8, 9].

The triboelectric effect has been known for over 2000 years [10], and nowadays, this effect has been utilized not only for energy harvesting but also in sensing applications [11]. The first TENG was proposed in 2012 [12]. While the effect can be readily employed in various applications, this phenomenon exhibits a complex nature attributed to the following reasons [10]: (1) Even on a surface with high charge density, the charge density can only reach 1 electron unit per ~10⁵ surface atoms. This implies that irrespective of

the degree of surface charging, the resulting charge per surface atom remains relatively low, thus leading to a notably modest charging rate. (2) Fundamental questions such as determining which surface will acquire a positive charge and which will become negatively charged upon contact remain challenging to answer definitively. Additionally, exceptions, such as those observed in cyclic triboelectric series from different theories, appear to be mutually exclusive. Various factors can influence the same triboelectric process, thereby complicating the comprehensive analysis by isolating each dominant parameter for modelling the triboelectric effect. Considering these intricate aspects of the triboelectric effect, numerous experiments have been undertaken. While these findings are commendable, their significance is significantly diminished due to the absence of more robust theoretical deductions to interpret the phenomena observed in the triboelectric process. Despite the utilization of numerous simulation and modelling methods to elucidate the phenomena, the lack of sufficient physical laws and mathematical descriptions further compounds the difficulty [10, 13, 14]. Nevertheless, these simulations and models are valuable for the development of practical applications.

2.1.TENG Structures

A TENG can be operated in four working modes [15-20] as shown with Figure 1.

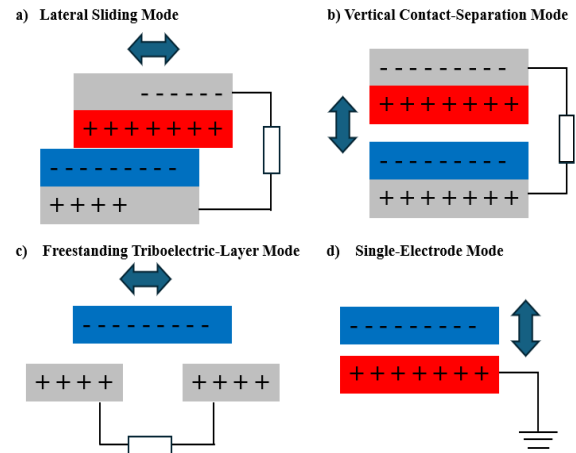


Figure 1: Operation modes of a TENG.

Lateral Sliding Mode (LSM): In this operational mode, friction between two dissimilar materials is used to generate free electrical charges. The direction of movement is lateral. The main applications of this mode can be summarized as wearable electronics, self-powered sensors, human-machine interfaces, energy harvesting from mechanical vibrations, and Internet of Things (IoT) devices [19].

Vertical Contact-Separation (VCS) Mode: This mode refers to a specific operational principle where two dissimilar materials are brought into contact and then separated vertically. This movement creates a cyclic process of contact and separation, which generates a triboelectric effect, leading to the generation of electricity. This mode is characterized by its ability to efficiently harvest mechanical energy from vertical motions, enabling the conversion of mechanical energy into electrical energy in various applications, such as energy harvesting from human motion, vibrations, or other mechanical sources [17].

Freestanding Triboelectric-Layer (FTL) Mode: In this operation mode, a configuration involves symmetric electrodes positioned beneath a dielectric film, where the width of the electrodes

and the gaps between them are comparable to the dimensions of the moving object. As the object approaches and moves away from the electrodes, an asymmetric distribution of electric charges occurs on the material's surface, leading to the flow of electrons between the electrodes and the mitigation of local potential differences. This process generates an alternating current (AC) output due to the oscillation of electrons. Importantly, since there is no direct friction or contact between the moving object and the top dielectric layer of the electrodes, free rotation becomes feasible without mechanical contact, thereby minimizing abrasion of the dielectric layer. This innovative approach significantly enhances the durability and prolongs the service life of TENGs operating in rotation mode. Consequently, the harvesting of energy from human locomotion, automobiles, and other moving objects becomes both feasible and convenient [20].

Single-Electrode (SE) Mode: In contrast to the previously described operating modes, this mode does not involve the use of two electrodes interconnected by an external circuit. Instead, two dissimilar materials function freely. To harness mechanical energy in this mode, a single-electrode TENG is utilized, with the bottom electrode grounded. As the top object approaches or departs from the bottom film, the local electrical field distribution changes, prompting electron flow between the ground and the bottom electrode to match the potential change. This energy harvesting strategy has been applied in both contact-sliding and contact-separation modes [18].

TENGs are very useful tools to harvest energy from mechanical movements and vibrations like piezoelectric energy harvesters. While the power density of TENGs varies between 0.1 and 100, piezoelectric nanogenerators (PNGs) have a power density ranging from 0.001 to 30 [21]. Variation of electrical power output of a Triboelectric Nano Generator (TENG), the selection of materials holds significant importance. In this context, a table known as the triboelectric series presented in Table 1, is utilized [21,22].

Table 1: Qualitative triboelectric series of common materials.

Triboelectric series		
Most + charged	0	Styrene and polystyrene
Hair, oily skin	Steel (no charge)	Orlon
Nylon, dry skin	Wood (small negative charge)	Plastic wrap
Glass	Amber	Polyurethane
Acrylic, lucite	Sealing wax	Polyethylene (like Scotch tape)
Leather	Polystyrene	Polypropylene
Rabbit's fur	Rubber balloon	Polyvinylchloride (PVC)
Quartz	Resins	Silicon
Mica	Hard rubber	Tefon (PTFE)
Lead	Nickel, copper	Silicone rubber
Cat's fur	Sulfur	Ebonite
Silk	Brass, silver	Most – charged
Aluminium	Gold, platinum	
Paper	Acetate, rayon	
Wool (no charge)	Synthetic rubber	
0	Polyester	

3. SIMULATIONS FOR TENG STRUCTURES

All simulations were performed for open circuit voltage and short circuit current conditions. Efficient energy harvesting can be achieved by using external sophisticated interface circuit.

3.1. Lateral Sliding (LS) Simulations

For LS mode simulations (Open circuit and short circuit), the structure depicted in Figure 2 is employed.

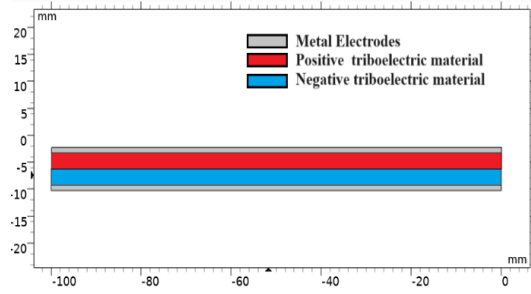


Figure 2: LS model used for simulation.

In these simulations, the bottom electrode and bottom triboelectric material are fixed, while the top electrode and top triboelectric materials are shifted by 1mm for each step. Selected parameters are listed for simulations in Table 2.

Table 2: Model Parameters for LS mode modelling.

Thickness of electrodes	0.1mm
Thickness of triboelectric materials	1mm
Length of the system	100mm
Amount of sliding	1mm
Relative permittivity of negative triboelectric material (ϵ_0)	2
Relative permittivity of positive triboelectric material (ϵ_0)	4
Initial surface charge density of negative triboelectric material	$-7e-6$ C/m ²
Initial surface charge density of positive triboelectric material	$7e-6$ C/m ²
Width of the system	100mm

The Surface electric potential distribution of the TENG operated in LS mode under the parameter set given in Table 2 is shown in Figure 3.

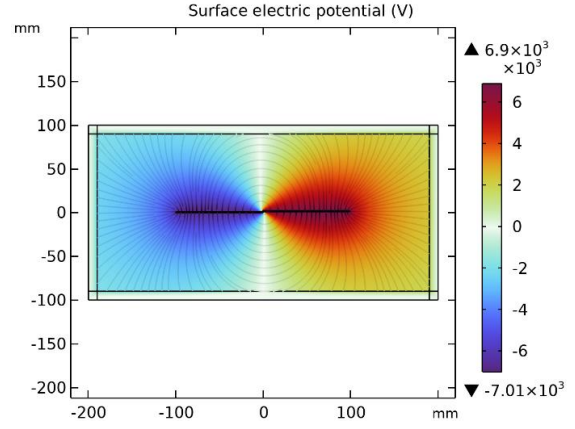


Figure 3: The change in surface electric potential in LS mode.

Electric potential distribution across the electrodes for open circuit condition is given with Figure 4 and the transferred charge amount to the electrodes has been provided in Figure 5 for the short circuit condition. Under the short circuit condition, boundary conditions were redefined as follows: the top of the electrodes was grounded, and the transferred charge amount was calculated in the simulation.

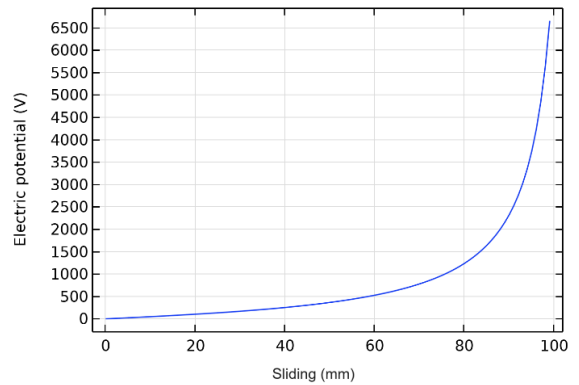


Figure 4: Electric potential of electrodes for open circuit condition in LS mode simulation.

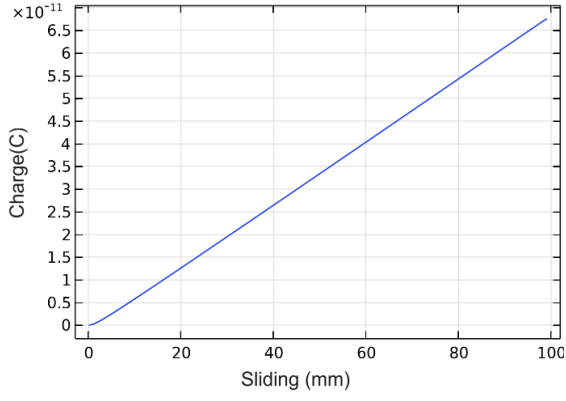


Figure 5: Transferred electric charge to the electrodes under short circuit conditions.

3.2. Vertical Contact-Separation (VCS) Simulations

For these simulations, the parameters listed in Table 3 were utilized. The same structure depicted in Figure 1 was employed, albeit at a different scale to reduce computational costs of simulation.

Table3: Model parameters for VCS mode modelling.

Thickness of electrodes	0.01mm
Thickness of triboelectric materials	0.1mm
Length of the system	5 mm
Amount of vertical sliding	1mm
Relative permittivity of negative triboelectric material (ϵ_0)	2
Relative permittivity of positive triboelectric material (ϵ_0)	4
Initial surface charge density of negative triboelectric material	$-7e-6$ C/m ²
Initial surface charge density of positive triboelectric material	$7e-6$ C/m ²
With of the system	5 mm

The surface electric potential distribution of the TENG operated in VCS mode at the end of the simulation is shown in Figure 6.

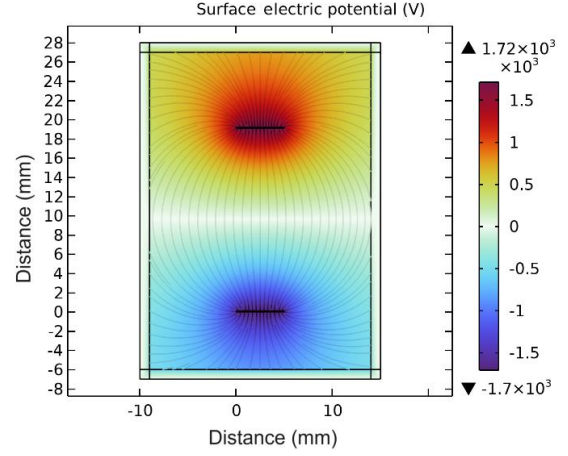


Figure 6: Surface electric potential distribution in VCS mode.

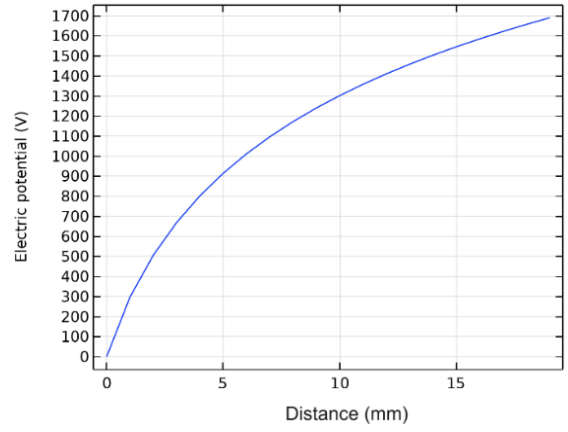


Figure 7: Electric potential of electrodes for open circuit condition in VCS mode simulation.

Transferred electrical charge on the short circuit condition to the electrodes has been given with Figure 8.

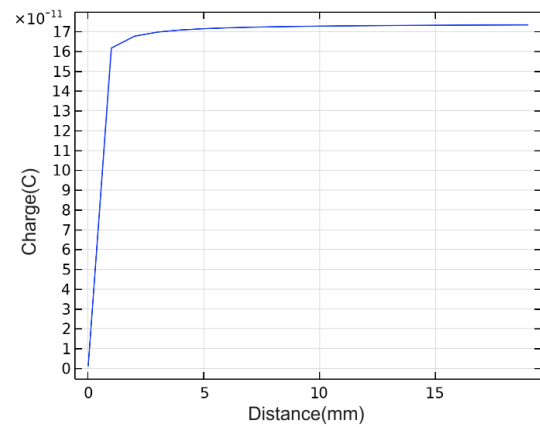


Figure 8: Transferred electric charge to the electrodes.

3.3. Freestanding Triboelectric-Layer (FTL) Simulations

In this stage, a configuration for FTL mode simulations given with Figure 9 is used.

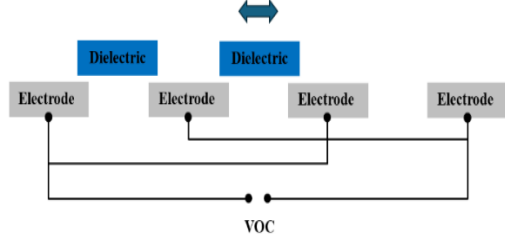


Figure 9: FTL mode model for simulations.

Parameter set has been used which is given by Table 4 in the simulations.

Table 4: Model Parameters for FTL mode modelling.

Thickness of electrodes	0.01mm
Thickness of triboelectric materials	0.1mm
Length of the electrodes and dielectrics	50 mm
Amount of vertical sliding	1mm
Relative permittivity of dielectric (ϵ_0)	2
Number of units	2
Surface charge density of dielectric	- 25e-5 C/m ²
Distances between electrodes	1mm
With of the system	5 mm
Gap between dielectric and electrode	0.0005mm

The surface electric potential distribution of the TENG operated in FTL mode at the end of the simulation is shown in Figure 10.

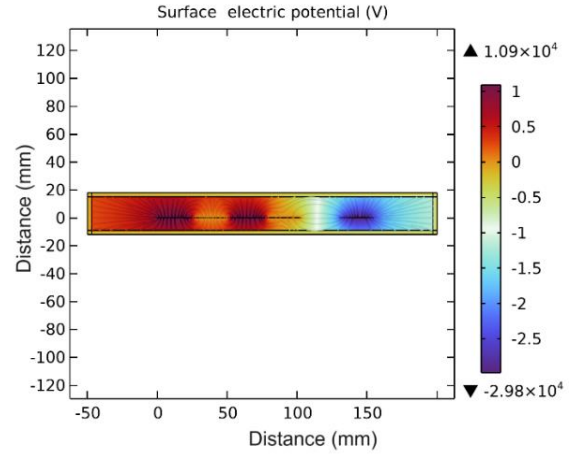


Figure 10: Surface electric potential distribution in FTL mode simulation.

Variation of the electrical potential on the electrodes for open circuit condition in FTL mode simulation under the parameter set given with Table 4 is given with Figure 11.

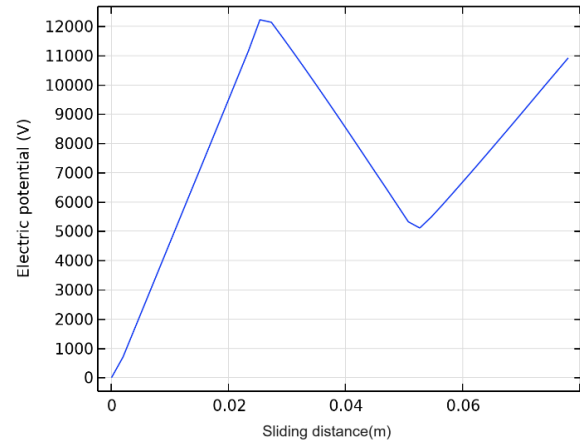


Figure 11: Electric potential of electrodes for open circuit condition in FTL mode simulation.

Another important case is the short circuit condition in FTL mode simulation. The charge transferred to the electrodes has been given by Figure 12 in short circuit condition in FTL mode simulation.

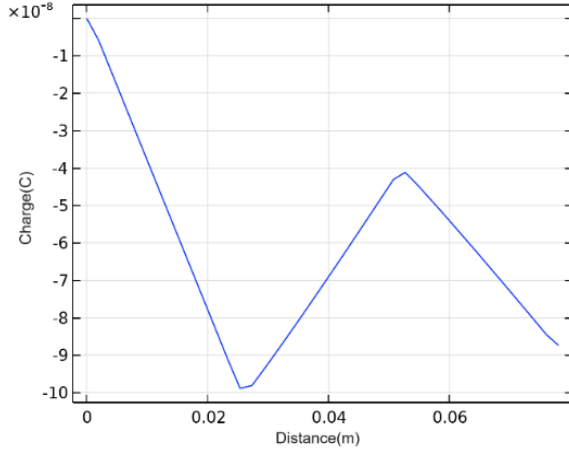


Figure 12: Transferred electric charge to the electrodes under short circuit conditions in FTL mode simulation.

3.4.Single - Electrode (SE) Simulations

The final operating mode in TENG structures is SE mode. For these simulations, a model depicted in Figure 1 (d) is utilized. A grounded metal and a dielectric are employed in the simulations. The simulations are conducted using the parameter set provided in Table 5.

Table 5: Model Parameters for SE mode modelling.

Thickness of electrode	1mm
Thickness of triboelectric materials	1mm
Length of the system	5 mm
Amount of vertical sliding	1mm
Relative permittivity of dielectric (ϵ_0)	2
Initial surface charge density of dielectric material	$7e-6$ C/m ²
With of the system	5 mm

Surface electric potential distribution for open circuit condition in SE mode simulation is given by Figure 13.

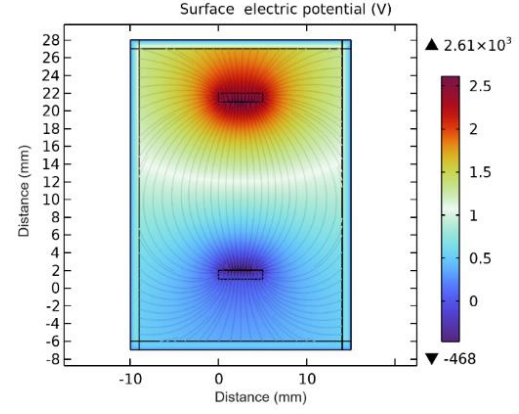


Figure 13: Surface electric potential distribution in SE mode simulation.

Open circuit voltage on the top of the dielectric material is shown in Figure 14.

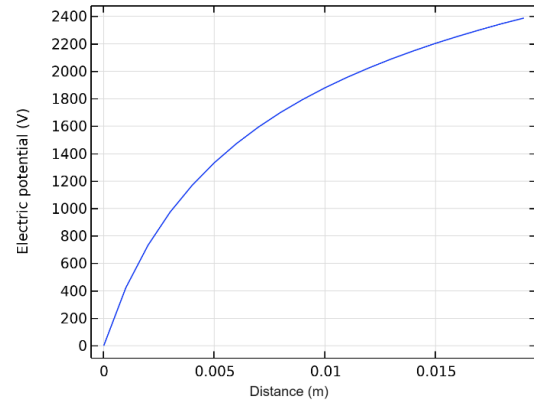


Figure 14: Electric potential of the top on the dielectric for SE mode simulation.

Other condition in SE mode modelling is the short circuit condition and amount of the transferred electrical charges to the grounded electrode has been shown in Figure 15.

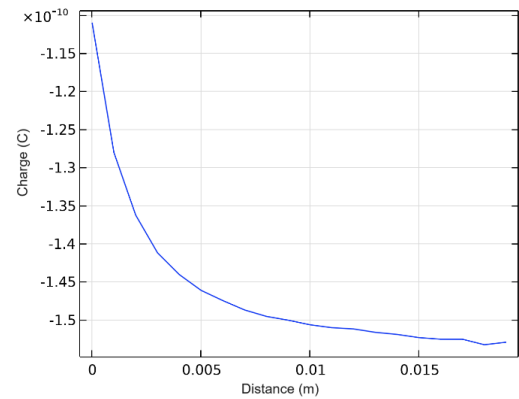


Figure 15: Transferred charge to the grounded electrode.

4.CONCLUSION

In this paper, four principles operation or working modes of a TENG have been investigated. Each mode has some advantages and disadvantages. Although TENGs have opportunities to supply energy for ultra-low power devices, some TENG structures need sophisticated interface circuits to harvest energy efficiently.

TENGs that work in the LS (Linear Sliding) mode have the capacity to produce energy even at lower speeds. Output voltage and current are relatively smoother and more stable in the LS mode compared to other modes, as depicted in Figures 4 and 5. However, this mode may not be suitable for higher speeds due to friction between materials.

In the VCS (Vertical Contact-Separation) mode, the maximum values of output voltage and current are restricted due to the nature of this mode. TENGs operating in this mode can generate relatively stable output voltage and current, as depicted in Figures 7 and 8. However, the working mechanism of this mode may produce unwanted sparks. Nevertheless, this mode is more suitable for operating at higher speeds compared to the LS (Linear Sliding) mode.

TENGs operating in the FTL mode require a rectifier circuit for energy harvesting applications due to the shape of the voltage and current waves. However, this mode is particularly suitable for high speeds. Additionally, the FTL mode enables the detection of very small movements, despite its more complex structure.

SE mode has very simple structure, but it has lowest energy output. In some cases, the SE mode

may experience output fluctuations. This can result in instability and inefficiency in energy conversion.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI

Ali Ekber ÖZDEMİR: Kavramsal tasarım, Veri düzenleme, Analiz, Denetim, Onaylama, Görselleştirme

Sibel AKKAYA OY: Metodoloji, Araştırma, Metodoloji, Yazma- Gözden geçirme ve Düzenleme

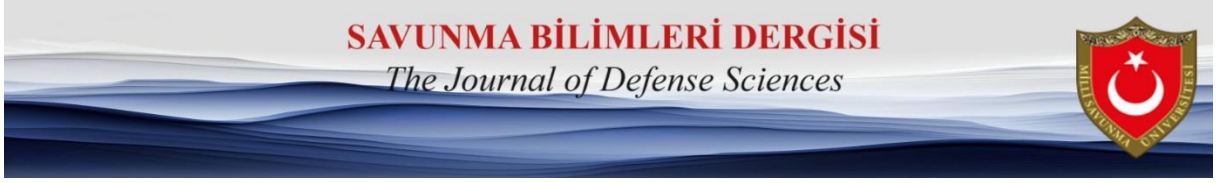
ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

REFERENCES

- [1] Q. He, F. Tapia, A. Reith, Quantifying the influence of nature-based solutions on building cooling and heating energy demand: A climate specific review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 186, 2023, 113660, ISSN 1364-0321,
- [2] S. Taslim, DM. Parapari, A. Shafaghat ,Urban design guidelines to mitigate urban heat island effects in hot-dry cities. Jurnal Teknologi, Volume 74, Issue 4, 2015.
- [3] Y.H. Chen, Y.Z. Li, H. Jiang, Z. Huang, Research on household energy demand patterns, data acquisition and influencing factors: A review, Sustainable Cities and Society, Volume 99, 2023, 104916, ISSN 2210-6707
- [4] M. -H. Chi, IC Technologies and Systems for Green Future, 2022 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), Shanghai, China, 1-5, 2022. doi: 10.1109/CSTIC55103.2022.9856769.
- [5] A. Torrissi, K. S. Yildirim and D. Brunelli, Low-Power Circuits and Energy-Aware Protocols for Connecting Batteryless Sensors, IEEE Communications Magazine, Volume. 61, No. 1, Pages 82-88, 2023. doi: 10.1109/MCOM.001.2200363.

- [6] M. Wajahat, AZ. Kouzani, SY. Khoo, M. Map. Comparative study and multi-parameter analysis to optimize device structure of triboelectric nanogenerators, *Nanotechnology*, Volume 34, No 42, 2023.
- [7] M. Song, et al., Current amplification through deformable arch-shaped film based direct-current triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy, *APPL. Energy*, Volume 344, Pages 121248, 2023. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121248.
- [8] A. E. Özdemir, Triboelectric-Based Wind-Driven Nano-Power Energy Generator, *Electric Power Components and Systems*, Volume 52, Issue 7, 1191-1199, 2024. DOI: 10.1080/15325008.2024.2317346
- [9] N.D. Yılmaz, Energy Harvesting with Triboelectric Nanogenerators: Theoretical Roots, Working Principles and Working Modes, *Konya Journal of Engineering Sciences*, Volume 9, Issue 1, Pages 232 – 249, 2021.
- [10] S. Pan, Z. Zhang Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review, *Friction*, Volume 7, Pages 2–17, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- [11] L. Dhakar, Study of Effect of Topography on Triboelectric Nanogenerator Performance Using Patterned Arrays. In: *Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications*, Springer Theses, Springer, 2017, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3815-0_3
- [12] F.-R. Fan, Z. Q. Tian and Z. L. Wang, Flexible triboelectric generator, *Nano Energy*, Volume 1, No 2, 328–334, 2012. DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.
- [13] Y. Zhang, Shao, T. Effect of contact deformation on contact electrification: A first-principles calculation. *J Phys Appl Phys* 46: 235304, 2013.
- [14] S. Lin, T. Shao, Bipolar charge transfer induced by water: Experimental and first-principles studies. *Phys Chem Chem Phys* 19: 29418–29423, 2017.
- [15] X. Xiong, J. Liang and W. Wu, “Principle and recent progress of triboelectric pressure sensors for wearable applications,” *Nano Energy*, vol. 113, 108542, 2023. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108542.
- [16] Q. Zheng, B. Shi, Z. Li and Z. L. Wang, “Recent progress on piezoelectric and triboelectric energy harvesters in biomedical systems,” *Adv. Sci.*, vol. 4, no. 7, 1–23, 2017. DOI: 10.1002/advs.201700029.
- [17] Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu and Y. Zi, 2016, Triboelectric nanogenerator: vertical contact-separation mode,” In *Triboelectric Nanogenerators. Green Energy and Technology*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-40039-6_2.
- [18] Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu and Y. Zi, 2016, “Triboelectric nanogenerator: single-electrode mode,” In *Triboelectric Nanogenerators. Green Energy and Technology*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-40039-6_4.
- [19] Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu and Y. Zi, 2016, “Triboelectric nanogenerator: lateral sliding mode,” In *Triboelectric Nanogenerators. Green Energy and Technology*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-40039-6_3.
- [20] Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu and Y. Zi, 2016, “Triboelectric nanogenerator: freestanding triboelectric-layer mode,” In *Triboelectric Nanogenerators. Green Energy and Technology*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-40039-6_5.
- [21] M. Davoudi, C.Y. An, DE. Kim, A Review on Triboelectric Nanogenerators, Recent Applications, and Challenges. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 2023. <https://doi.org/10.1007/s40684-023-00569-6>.
- [22] A.F. Diaz, R.M. Felix-Navarro, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties. *Journal of Electrostatics*, 62(4), 277–290, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.05.005>.


<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

k Grup Regresyon Modelinin Eşitliği için Kullanılan Testlerinin Karşılaştırılması

Comparison of Tests for Equality of the k Group Regression Model

Faik Ümit DİRİ^{1*}, Fikri GÖKPINAR², Esra GÖKPINAR²

¹Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, Endüstri ve Sistem Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27.09.2024
Düzeltilme: 31.10.2024
Kabul: 05.11.2024

Keywords

Heterogeneous variance
Coefficient equation
Regression model
Simulation

Anahtar Kelimeler

Heterojen varyans
Katsayı eşitliği
Regresyon modeli
Simülasyon

Önemli Noktalar

Bu çalışmada, varyansların eşit olmadığı durumlarda k grup regresyon modelinin eşitliğinin testi problemi ele alınmıştır. Bu problem için literatürde yaygın olarak kullanılan Genelleştirilmiş Chow testi (GCT), Genelleştirilmiş Wald testi (GWT), Ağırlıklı F Testi (AFT), Düzeltilmiş Ki-Kare Testi (DKT), Düzeltilmiş Ağırlıklı F Testi (DAFT), yeni F Testi I (YFT1), yeni F Testi II (YFT2) ve Parametrik Bootstrap testi (PBT) ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, grup sayısı, bağımsız değişken sayısı, örnek çapları ve hata varyanslarının farklı kombinasyonları dikkate alınarak kapsamlı bir simülasyon çalışmasıyla bu testlerin deneysel I. tip hata oranlarının karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo Özet

k=3, m=2 için Testlerin Deneysel I.Tip Hata Oranları

n_1, n_2, n_3	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	GCT	GWT	AFT	DKT	DAFT	YFT1	YFT2	PBT
(7;7;7)	1;1;1	0.0485	0.1393	0.0817	0.0425	0.0307	0.0187	0.0209	0.0456
	1;2;4	0.0909	0.1675	0.1028	0.0548	0.0427	0.0273	0.0291	0.0508
	1;4;8	0.0973	0.1765	0.1120	0.0693	0.0526	0.0367	0.0384	0.0552

Özet

Regresyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkileri modellemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu analizlerde veriler, farklı zaman dilimlerinden veya farklı gruplardan elde edilebilir. Farklı koşullar altında regresyon modellerinin aynı kalıp kalmadığını belirlemek için regresyon modellerinin eşitliği testi yapılır. Bu çalışmada, heterojen varyans varsayımı altında k grup regresyon modelinin eşitliğini test etmek için yaygın olarak kullanılan testler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Testlerin deneyselle I. tip hata değer performansı, grup sayısı, bağımsız değişken sayısı, örnek büyüklükleri ve hata varyanslarının farklı kombinasyonları dikkate alınarak kapsamlı bir simülasyon çalışmasıyla değerlendirilmiştir.

Abstract

Regression analysis is a widely used method for modelling relationships between variables. In these analyses, data can be obtained from different time periods or from different groups. To determine whether the regression models remain the same under different conditions, a test of equality of regression models is performed. In this study, the tests commonly used to test the equality of k group regression models under the assumption of heterogeneous variance are analysed in detail. The empirical type I error value performance of the tests is evaluated through a comprehensive simulation study considering different combinations of number of groups, number of independent variables, sample sizes and error variances.

*Corresponding author, e-mail: fudiri@kho.msu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğrusal regresyon modelleri; ekonomi, tıp, mühendislik, tarım, biyoloji, psikoloji gibi birçok farklı araştırma alanlarında, değişkenler arasında ilişkiyi ortaya çıkarmak için sıklıkla kullanılır. Aralarında ilişki aranan değişkenlerden biri bağımlı (sonuç) diğeri bağımsız (sebebe) değişken olmak üzere regresyon analizi ile bilinen bağımsız değişken veya değişkenler yardımıyla bilinmeyen bağımlı değişkenin alacağı değerin kestirilmesi amaçlanır. Ancak bu tür ilişkilerin, farklı zaman dilimleri için değişip değişmediği veya aynı ilişkinin farklı yığın ya da yığınlar için uygulanıp uygulanamayacağı da bilinmek istenir. Örneğin 2008 küresel ekonomik kriz öncesi ve sonrası belli bir bölgedeki ekonomik ilişkileri belirleyen regresyon denklemlerinin katsayıları arasında farklılık olabilir, bu durumda regresyon modellerinin aynı kalıp kalmadığını test etmek gerekir.

Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin, iki farklı zaman dilimi veya iki farklı yığın için aynı olup olmadığını belirlemede yaygın olarak kullanılan test Chow testidir. Bu test, hata varyanslarının homojenliği varsayımı altında iki doğrusal regresyon modelinin ($k=2$) katsayılarının eşitliğini test etmek için Chow tarafından önerilmiştir [1]. Bununla birlikte, hata varyanslarının homojen olmaması (heterojen varyans) durumunda Toyoda bir test geliştirmiş ve değişen varyans koşulları altında Chow testinin deneysel I. tip hata olasılığının olumsuz yönde etkilenerek nominal değerden büyük değerler aldığını göstermiştir [2]. Toyoda'yı takiben, literatürde Chow testinin çeşitli modifikasyonları ve yeni test yöntemleri önerilmiştir.

Örnek çapları ve varyans değerlerinin farklı kombinasyonları altında Chow testini genişleten veya genelleştiren ya da alternatif testler öneren çalışmalar mevcuttur [3-15].

Gerçek hayatta sıklıkla karşılan bir durumda, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin, ikiden fazla farklı zaman dilimi veya ikiden fazla farklı yığın için aynı olup olmadığının analiz edilmesi problemidir. Bundan dolayı ikiden fazla doğrusal regresyon modellerinin katsayılarının eşitliği ($k > 2$) için yapılan çalışmalar önem arz etmektedir. Dufour, Scheffe'nin klasik doğrusal model için oluşturduğu olabilirlik oran testinden faydalanarak varyansların homojenliği varsayımı altında klasik F testi olarak da bilinen Genelleştirilmiş Chow testini elde etmiştir [16]. Ancak, yukarıda $k=2$ durumu için belirtildiği gibi varyanslar eşit değilse bu test iyi performans göstermemektedir. Gerçek hayat problemlerinde ise bu varsayım her zaman sağlanamayacağı için değişen varyans varsayımı altında, k grup normal regresyon modellerinin regresyon katsayılarının eşitliğini test etmek daha önemli hale gelmiştir. Koschat ve Weerahandi yaptıkları çalışmada, Weerahandi (1987)'nin $k=2$ durumu için önerdiği Genelleştirilmiş F testinin $k>2$ için genelleştirmiş halini geliştirmişlerdir [14]. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiği zaman, May yaptığı çalışmada k grup regresyon modelinin eşitliğinin testi için Parametrik Bootstrap (PB) yöntemini önermiştir [17]. Alvandi ve diğerleri yaptığı çalışmada, Wald test istatistiğinin k grup için genelleştirilmiş halini kullanarak bazı metotlar önermiştir [18].

Buna göre bu test istatistiğinin beklenen değerini ve varyansını kullanarak, bu testin Bartlett

yaklaşımını, Ağırlıklı F yaklaşımlarını ve kendi önerdiği iki ayrı F testi geliştirmişlerdir.

Literatür incelendiğinde k grup regresyon modelinin eşitliği testi problemini ele alan çok az çalışma yapıldığı görülmüştür. Yapılan çalışmalar incelendiğinde ise, testlerin performansı için yapılan simülasyon çalışmalarında çoğunlukla deneme sayısı 2500 ve bağımsız değişken sayısının 1 alındığı görülmektedir. Dolayısıyla deneme sayısı ve bağımsız değişken sayısının testlerin performansı üzerindeki etkisinin yeterli düzeyde dikkate alınmadığı görülmüştür. Bu amaçla, çalışmada heterojen varyans varsayımı altında k grup regresyon modelinin katsayılarının eşitliği problemi ele alarak literatüre katkı sağlamaktır.

Bu bağlamda çalışmada, k grup regresyon modelinin eşitliği testi için Genelleştirilmiş Chow testi, Alvandi ve diğerleri tarafından önerilen yöntemler (Genelleştirilmiş Wald testi, Ağırlıklı F testi, Düzeltilmiş Ki-Kare testi, Düzeltilmiş Ağırlıklı F testi, yeni F testi I, yeni F testi II), ve Parametrik Bootstrap testi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Örnek çaplarının büyüklüğü, örnek çaplarının eşit veya farklı olması, hata varyanslarının eşit veya farklı olması durumları ile grup sayısı ve bağımsız değişken sayısının farklı durumları dikkate alınarak testlerin I.tip hata oranlarının bu kombinasyonlardan nasıl etkilendiği 10000 deneme sayısı ile yapılan kapsamlı simülasyon çalışması ile ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Buna göre çalışmanın 2. Bölümünde test istatistikleri için kullanılacak olan regresyon modeli ve literatürde yaygın olarak kullanılan test istatistikleri hakkında bilgi verilmiştir. 3. Bölümde, bahsedilen test istatistikleri simülasyon

çalışmasına dayalı olarak deneysel I. tip hata oranları elde edilerek tablolar halinde sunulmuştur. Son olarak 4. Bölümde ise yapılan bu çalışma ile ilgili olarak sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. TEST İSTATİSTİKLERİ (TEST STATISTICS)

Bu bölümde k grup regresyon modelinin eşitliği için önerilen bazı testler tanıtılmıştır. Bu amaçla ilk olarak bazı ortak temel tanımlar verilmiştir. Buna göre, k grup için çoklu lineer regresyon modeli

$$\underline{y} = \underline{X}\underline{\beta} + \underline{\varepsilon} \text{ dir.} \quad (1)$$

Burada;

$$\underline{y} = (\underline{y}_1, \dots, \underline{y}_k)',$$

$$\underline{X} = (\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_k)',$$

$$\underline{\beta} = (\underline{\beta}_1, \dots, \underline{\beta}_k)',$$

$$\underline{\varepsilon} = (\underline{\varepsilon}_1, \dots, \underline{\varepsilon}_k)' \text{ şeklindedir.}$$

p , bağımsız değişken sayısını ve $m=p+1$, tahmin edilecek parametre sayısını göstermektedir.

$\underline{y}_i = (y_{i1}, \dots, y_{in_i})'$, i . gruba ait $n_i \times 1$ boyutlu bağımlı değişken gözlem vektörü, $\underline{X}_i$, $n_i \times (p+1)$ boyutlu bağımsız (açıklayıcı) değişkenler gözlem matrisi olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$\underline{X}_i = \begin{bmatrix} 1 & x_{i11} & x_{i12} & \dots & x_{i1p} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{in_i1} & x_{in_i2} & \dots & x_{in_ip} \end{bmatrix}_{n_i \times (p+1)}$$

$$i = 1, \dots, k.$$

$\underline{\beta}_i = (\beta_{i0}, \beta_{i1}, \dots, \beta_{ip})'$, i . gruba ait $m \times 1$ boyutlu katsayı vektörü, $\underline{\varepsilon}_i = (\varepsilon_{i1}, \dots, \varepsilon_{in_i})'$, i . gruba ait $n_i \times 1$ boyutlu hata terimleri vektörüdür. Burada, $\underline{\varepsilon}_i \sim N(0, \sigma_i^2 I_{n_i})$, (I_{n_i} , $n_i \times n_i$ boyutlu birim

matrisi) olup ve tüm $\underline{\epsilon}_i$ 'lerin bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca $\underline{X}^*$ matrisi yukarıda tanımlanan $\underline{X}$ matrisinden farklı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmış bir matristir.

$$\underline{X}^* = \begin{bmatrix} \underline{X}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \underline{X}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & & \underline{X}_k \end{bmatrix}_{(\sum_{i=1}^k n_i \times k(p+1))}$$

Buna göre, k grup regresyon modelinin katsayılarının eşitliği testi için yokluk ve alternatif hipotezler aşağıdaki gibidir.

$$H_0: \underline{\beta}_1 = \underline{\beta}_2 = \cdots = \underline{\beta}_k$$

$$H_1: \underline{\beta}_i \neq \underline{\beta}_j, \exists i \neq j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

Bu bilgiler ışığında yokluk hipotezinin testi için incelenen testlere aşağıda yer verilmiştir.

2.1. Genelleştirilmiş Chow Testi

$k > 2$ grup için regresyon modellerinin katsayılarının eşit olup olmadığının test edilmesi için Dufour, Scheffe'nin klasik doğrusal model için oluşturduğu olabilirlik oran testinden faydalanarak Genelleştirilmiş Chow Testini elde etmiştir [16]. Buna göre, k grup regresyon modeli için hata kareler toplamı,

$$SS = (\underline{y} - \underline{X}\underline{\beta})'(\underline{y} - \underline{X}\underline{\beta})$$

ve i . regresyon modeli için hata kareler toplamı,

$$SS_i = (\underline{y}_i - \underline{X}_i \underline{\beta}_i)'(\underline{y}_i - \underline{X}_i \underline{\beta}_i), \quad i = 1, \dots, k$$

olarak elde edilir. Buradan, toplam hata kareler toplamı, $SS_T = \sum_{i=1}^k SS_i$ olarak bulunur. Ayrıca, $r_0 = \text{rank}(\underline{X})$, $r = \sum r_i = \text{rank}(\underline{X}^*)$ olmak üzere Genelleştirilmiş Chow test istatistiği,

$$F_{GC} = \frac{v}{v_0} \frac{SS - SS_T}{SS_T} \quad (3)$$

olarak elde edilir. Yokluk hipotezinin doğruluğu altında F_{GC} istatistiği, $v_0 = \sum_{i=1}^k r_i - r_0$ ve

$v = \sum_{i=1}^k n_i - \sum_{i=1}^k r_i$ serbestlik dereceleri ile F dağılıma sahiptir ve $F_{GCT} > F_{v_0, v}(\alpha)$ ise H_0 red edilir.

2.2. Genelleştirilmiş Wald Testi

i . regresyon modeli için, $\underline{\beta}_i$ ve σ_i^2 'nin en küçük kareler tahmin edicisi sırasıyla,

$$\underline{\hat{\beta}}_i = (\underline{X}_i' \underline{X}_i)^{-1} \underline{X}_i' \underline{y}_i$$

$$S_i^2 = \frac{1}{n_i - m} (\underline{y}_i - \underline{X}_i' \underline{\hat{\beta}}_i)' (\underline{y}_i - \underline{X}_i' \underline{\hat{\beta}}_i),$$

$$i = 1, 2, \dots, k.$$

Bu tahmin ediciler,

$$\underline{\hat{\beta}}_i \sim N_p(\underline{\beta}_i, \sigma_i^2 (\underline{X}_i' \underline{X}_i)^{-1}),$$

$$S_i^2 \sim \frac{\sigma_i^2}{n_i - m} \chi_{(n_i - m)}^2$$

dağılımlarına sahiptir. Ayrıca yukarıda tanımlanan $\underline{\hat{\beta}}_i$ vektörlerinin birleştirilmiş hali ve hata terimlerinin varyans kovaryans matrisi aşağıda verilmiştir. Jayatissa ve Watt tarafından önerilen Wald test istatistiğinin, Alvandi ve diğerleri yaptığı çalışmada k grup için genelleştirilmiş hali

$$T = \sum_{i=1}^k S_i^{-2} (\underline{\hat{\beta}}_i - \underline{\hat{\beta}})' (\underline{X}_i' \underline{X}_i) (\underline{\hat{\beta}}_i - \underline{\hat{\beta}}) \quad (4)$$

$$T = \sum_{i=1}^k S_i^{-2} \underline{\hat{\beta}}_i (\underline{X}_i' \underline{X}_i) \underline{\hat{\beta}}_i - \underline{\hat{\beta}}' \left[\sum_{i=1}^k S_i^{-2} (\underline{X}_i' \underline{X}_i) \right] \underline{\hat{\beta}}$$

Burada $\underline{\hat{\beta}}$,

$$\underline{\hat{\beta}} = [\sum_j S_j^{-2} (\underline{X}_j' \underline{X}_j)]^{-1} \sum_{i=1}^k S_i^{-2} (\underline{X}_i' \underline{X}_i) \underline{\hat{\beta}}_i$$

$$\underline{\hat{\beta}} = [\sum_j S_j^{-2} (\underline{X}_j' \underline{X}_j)]^{-1} \sum_{i=1}^k S_i^{-2} \underline{X}_i' \underline{y}_i$$

dir [18].

Büyük örnek çapları için, T istatistiği yaklaşık olarak $m(k-1)$ serbestlik dereceli ki-kare dağılımına sahiptir, yani $T \sim \chi^2_{m(k-1)}$ 'dir. H_0 hipotezi doğruluğu altında, $T > \chi^2_{m(k-1)}(\alpha)$ ise H_0 red edilir.

2.3. Ağırlıklı F Testi (Asimptotik Chow Testi)

Goldfeld ve Quandt, tarafından Wald test istatistiğinin yeniden düzeltilmiş ve Asimptotik Chow testi olarak da bilinen bu test istatistiği Alvandi ve diğerleri tarafından k grup için genelleştirilmiştir. Buna göre ağırlıklı F test istatistiği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_{AF} = \frac{T}{m(k-1)} \quad (5)$$

T_{AF} istatistiğinin dağılımı $m(k-1)$ ve $\sum_i(n_i - m)$ serbestlik dereceleri ile F dağılımına yakınsar. H_0 hipotezi doğruluğu altında $T_{AF} > F_{m(k-1), \sum_i(n_i - m)}(\alpha)$ ise H_0 red edilir.

2.4. Düzeltilmiş Ki-Kare Testi

Büyük örnek çapları için (4)'de verilen T istatistiği yaklaşık olarak $m(k-1)$ serbestlik dereceli ki-kare dağılımına sahiptir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın küçük örneklerde iyi performans göstermemektedir. Bu amaçla, Alvandi ve diğerleri, bu testi Bartlett yaklaşımını kullanarak küçük örnekler için yeniden düzenlemiştir. (4) eşitliğinde verilen T istatistiğinin dağılımı $T/c \sim \chi^2_{m(k-1)}$ şeklinde olacaktır.

Burada,

$$c = m_G / (m(k-1))$$

ve

$$m_G = E(T/H_0)$$

olmak üzere bu ifadenin yaklaşık değeri $\tilde{m}_G$ aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\tilde{m}_G = \sum_i \frac{(n_i - m)m}{n_i - m - 2} (1 - w_i) \quad (6)$$

$$\tilde{m}_G = m(k-1) + 2m \sum_i \frac{1-w_i}{n_i - m - 2}$$

Burada, $w_i = S_i^{-2} / \sum_j S_j^{-2}$ dir. Dolayısıyla, düzeltilmiş ki-kare test istatistiği

$$T_{DK} = \frac{m(k-1)}{\tilde{m}_G} T \quad (7)$$

olarak elde edilir. H_0 hipotezi doğruluğu altında $T_{DK} > \chi^2_{m(k-1)}(\alpha)$ ise H_0 hipotezi red edilir.

2.5. Düzeltilmiş Ağırlıklı F Testi

Alvandi ve diğerleri, Ağırlıklı F testi yaklaşımını kullanarak T istatistiğini F dağılımına yaklaştırmayı amaçlamıştır. Bu yöntemde, $T/c^* \sim F_{m(k-1), \sum_i(n_i - m)}$ yaklaşımı kullanılır. Düzeltilmiş Ağırlıklı F testi için, (2.5)'de verilen $\tilde{m}_G$ değerinden faydalananak, $c^* = \tilde{m}_G [\sum_i(n_i - m) - 2] / \sum_i(n_i - m)$ eşitliği elde edilerek düzeltilmiş ağırlıklı F test istatistiği;

$$T_{DAF} = \frac{\sum_i(n_i - m)}{\tilde{m}_G (\sum_i(n_i - m) - 2)} T \quad (8)$$

şeklinde bulunmuştur. H_0 hipotezi doğruluğu altında $T_{DAF} > F_{m(k-1), \sum_i(n_i - m)}(\alpha)$ ise H_0 hipotezi red edilir.

2.6. Yeni F Testi I

Alvandi ve diğerleri, T 'nin beklenen değeri kullanılarak bir F yaklaşımı elde etmiştir [18].

Bu yaklaşımda T istatistiğinin dağılımı $T/(m(k-1)) \sim F_{m(k-1), r^*}$ şeklinde bir yaklaşımla ifade edilmiştir.

Burada (6)'da verilen $\tilde{m}_G$ değerinden faydalananak r^* değeri;

$r^* = 2\tilde{m}_G/(\tilde{m}_G - m(k-1))$ olmak üzere yeni F testi I istatistiği,

$$T_{YFTI} = \frac{T}{m(k-1)} \quad (9)$$

olarak elde edilir. H_0 hipotezi doğruluğu altında,

$T_{YFTI} > F_{m(k-1),r^*}(\alpha)$ ise H_0 hipotezi red edilir.

2.7. Yeni F Testi II

Alvandi ve diğerleri, bu yaklaşımında, T 'nin hem beklenen değeri hem de varyansını kullanarak T istatistiğinin bir F yaklaşımını elde etmişlerdir [18]. Bu yaklaşımda, $n_i > 6$ ise, T istatistiğinin dağılımı,

$$T/(c^{**}m(k-1)) \sim F_{m(k-1),r}$$

şeklinde bir yaklaşımla ifade edilmiştir. Burada r ve c^{**} :

$$r = 2 \frac{[m(k-1) - 2]\tilde{m}_G^2 + 2m(k-1)\tilde{v}_G}{m(k-1)\tilde{v}_G - 2\tilde{m}_G^2}$$

ve

$$c^{**} = \frac{(\tilde{m}_G^2 + \tilde{v}_G)\tilde{m}_G}{[m(k-1) - 2]\tilde{m}_G^2 + 2m(k-1)\tilde{v}_G}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Ayrıca (6)'da verilen $\tilde{m}_G$ değerinden faydalanarak ve $v_G = Var(T|H_0)$ olmak üzere,

v_G 'nin değeri $\tilde{v}_G$ ile yaklaşık olarak,

$$\tilde{v}_G = \sum_i \frac{2m(n_i - m)^2}{(n_i - m - 2)^2(n_i - m - 4)} x$$

$$[(n_{i-} - 2)(1 - 2w_i) + (m + 2) +$$

$$w_i^2 + 2m \left(\sum_i \frac{(n_i - m)}{(n_i - m - 2)} w_i \right)^2$$

şeklinde elde edilir. Buna göre yeni F testi II istatistiği,

$$T_{YFT2} = \frac{T}{c^{**}m(k-1)} \quad (10)$$

olarak elde edilir. H_0 hipotezi doğruluğu altında

$T_{YFT2} > F_{m(k-1),r}(\alpha)$ ise H_0 hipotezi red edilir.

2.8. Parametrik Bootstrap Testi

May, önerdiği parametrik bootstrap (PB) yaklaşımı için (4)'de verilen T istatistiğinin gözlenen değeri T_0 için; parametrik bootstrap p -değeri $P(T_B(\hat{\beta}_B, \hat{\Sigma}_B) > T_0)$ olarak elde edilir. p -değeri, aşağıda açıklandığı gibi Monte Carlo simülasyonu kullanılarak tahmin edilir [17].

$\hat{\beta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k)'$ olmak üzere;

$\hat{\beta} \sim N_{mk}(\hat{\beta}, \Sigma)$ dağılımına sahiptir ve burada $\Sigma = \text{köş}(\sigma_i^2(X_i'X_i)^{-1})$ dir.

Σ 'nın tahmini $\hat{\Sigma}$ olup,

$\hat{\Sigma} = [\text{diag}(\hat{\sigma}_i^2(X_i'X_i)^{-1})]$ 'dir.

$$C = \begin{bmatrix} I_p & 0 & 0 & 0 & -1_p \\ 0 & I_p & 0 & \dots & 0 & -1_p \\ 0 & 0 & I_p & & 0 & -1_p \\ & \vdots & & \ddots & & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & I_p & -1_p \end{bmatrix}_{q \times km},$$

$q = (k-1)m$, olmak üzere, H_0 hipotezi doğruluğu altında, $C\hat{\beta} \sim N_q(0, C\Sigma C')$ şeklinde verilmiştir.

$T_B(\hat{\beta}_B, \hat{\Sigma}_B) = Z' \hat{W}_B^{-1} Z$ olmak üzere;

$Z \sim N_q(0, I_q)$ ve $\hat{W}_B = \hat{H} \Sigma_B \hat{H}'$ dir.

Bu nedenle Σ bilindiğinde, σ_i^2 'nin en küçük kareler tahmin edicisi S_i^2 'nin dağılımı kullanılarak W dağılımı bulunabilir.

$H = (C\Sigma C')^{(-\frac{1}{2})} C$ olmak üzere, burada $\hat{H}$, $\hat{\Sigma}$ kullanılarak aşağıdaki gibi tahmin edilir.

$$\hat{\Sigma}_B = \text{diag}[\hat{\sigma}_1^{*2}(X_1'X_1)^{-1}, \dots, \hat{\sigma}_k^{*2}(X_k'X_k)^{-1}]$$

Bu yöntem algoritma olarak aşağıdaki gibi verilmiştir.

1.Adım: Verilerden, T_0 istatistiği hesaplanır.

2.Adım: $Z \sim N_q(0, I_q)$ dağılımından bağımsız değişken oluşturulur

3.Adım: $S_i^2, i = 1, \dots, k$ hesaplanır.

4.Adım: $\hat{\sigma}_i^{*2}$ hesaplanır.

$$\hat{\sigma}_i^{*2} \sim \frac{S_i^2 \chi_{(n_i-m)}^2}{n_i - m}$$

dağılımından hesaplanır.

5.Adım:

$$\hat{\Sigma}_B = \text{diag} [\hat{\sigma}_1^{*2} (\underline{X}_1' \underline{X}_1)^{-1}, \dots, \hat{\sigma}_k^{*2} (\underline{X}_k' \underline{X}_k)^{-1}]$$

$$[\hat{\sigma}_1^{*2} (\underline{X}_1' \underline{X}_1)^{-1}, \dots, \hat{\sigma}_k^{*2} (\underline{X}_k' \underline{X}_k)^{-1}] \text{ ve}$$

$$\hat{W}_B = \hat{H} \hat{\Sigma}_B \hat{H}' \text{ hesaplanır.}$$

6.Adım: (4) eşitliği kullanılarak

$$T_B(\hat{\beta}_B, \hat{\Sigma}_B) = Z' \hat{W}_B^{-1} Z \text{ hesaplanır.}$$

7.Adım: $T_B \geq T_0$ olup olmadığı kontrol edilir.

8.Adım: $L=10\ 000$ kez Adım 2'den 6'ya kadar tekrarlanır.

Daha sonra p değeri $\hat{p} = \#(T_B \geq T_0)/L$ olarak elde edilir.

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Bu bölümde, $k > 2$ grup için regresyon modellerinin katsayılarının eşit olup olmadığının test için 2.Bölümde anlatılan Genelleştirilmiş Chow testi (GCT), Genelleştirilmiş Wald testi (GWT), Ağırlıklı F testi (AFT), Düzeltilmiş Ki-Kare testi (DKT), Düzeltilmiş Ağırlıklı F testi

(DAFT), yeni F testi I (YFT1), yeni F testi II (YFT2) ve Parametrik Bootstrap testi (PBT) simülasyon yoluyla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla simülasyon çalışmasında i .nci grubun regresyon modelini oluşturmak için,

$$X_{ij} = (1, N(0, 1))$$

dağılımından üretilmiştir. Hata terimi $\underline{\varepsilon}_i \sim N(0, \sigma_i^2 I_{n_i})$ dağılımından üretilmek üzere σ_i^2 için aşağıda tablolarda verildiği gibi farklı değerler alınmıştır.

β_i vektörü 0'lardan oluşturulmuş ve nominal α değeri 0.050 olarak alınmıştır. Testlerin deneysel I. tip hata oranları için simülasyon çalışmasında tekrar sayısı (L) 10000 alınmıştır.

Çalışmada örnek çaplarının büyüklüğü, örnek çaplarının aynı veya farklı olması, grup sayısı ve bağımsız değişken sayısının farklı kombinasyonları dikkate alınmıştır.

Simülasyon çalışması MATLAB 2023b programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada deneysel I. tip hata oranı için sınır değer olarak 0.06 olarak alınmıştır. Buna göre, deneysel I. tip hata oranları 0.06'dan yüksek çıkan değerler koyu gösterilmiştir.

Ayrıca DKT, DAFT ve YFT1 testlerinin teorik yapısından dolayı $n > m + 2$ koşulunu, YFT2 testinin ise $n > m + 4$ koşulunu sağlaması gerekir. Bu koşulların sağlamadığı durumlar için testlerin deneysel I.tip hataları elde edilmemiş ve tabloda “-” şeklinde gösterilmiştir.

Buna göre tüm testlerin elde edilen deneysel I. tip hata oranları Tablo 1-Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 1: $k=3$, $m=2$ için testlerin deneysel I.Tip hata oranları.

n_1, n_2, n_3	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	GCT	GWT	AFT	DKT	DAFT	YFT1	YFT2	PBT
(7;7;7)	1;1;1	0.0485	0.1393	0.0817	0.0425	0.0307	0.0187	0.0209	0.0456
	1;2;4	0.0909	0.1675	0.1028	0.0548	0.0427	0.0273	0.0291	0.0508
	1;4;8	0.0973	0.1765	0.1120	0.0693	0.0526	0.0367	0.0384	0.0552
(15;15;15)	1;1;1	0.0482	0.0845	0.0621	0.0496	0.0426	0.0316	0.0387	0.0488
	1;2;4	0.0806	0.0856	0.0653	0.0514	0.0446	0.0358	0.0404	0.0460
	1;4;8	0.0899	0.1020	0.0788	0.0649	0.0565	0.0454	0.0502	0.0537
(30;30;30)	1;1;1	0.0501	0.0638	0.0557	0.0519	0.0490	0.0427	0.0471	0.0509
	1;2;4	0.0773	0.0688	0.0591	0.0529	0.0493	0.0420	0.0461	0.0503
	1;4;8	0.0777	0.0695	0.0595	0.0545	0.0507	0.0442	0.0474	0.0484
(7;11;15)	1;1;1	0.0478	0.1203	0.0840	0.0534	0.0444	0.0281	0.0311	0.0522
	1;2;4	0.0234	0.1029	0.0681	0.0486	0.0395	0.0281	0.0326	0.0460
	1;4;8	0.0226	0.1063	0.0734	0.0594	0.0500	0.0367	0.0421	0.0517
	4;2;1	0.2301	0.1458	0.1107	0.0675	0.0614	0.0371	0.0372	0.0559
(7;19;30)	1;1;1	0.0486	0.1124	0.0935	0.0619	0.0569	0.0412	0.0409	0.0550
	1;2;4	0.0092	0.0814	0.066	0.0514	0.0458	0.0349	0.0391	0.0492
	1;4;8	0.0088	0.0795	0.0624	0.0536	0.0475	0.0389	0.0432	0.0498
	4;2;1	0.3766	0.1312	0.1135	0.0685	0.0637	0.0427	0.0401	0.0530
(15;23;30)	1;1;1	0.0456	0.0700	0.0587	0.0489	0.0439	0.0352	0.0417	0.0465
	1;2;4	0.0280	0.0746	0.0596	0.0522	0.0476	0.0386	0.0450	0.0504
	1;4;8	0.0286	0.0751	0.0609	0.0568	0.0522	0.0444	0.0491	0.0513
	4;2;1	0.1949	0.0884	0.0767	0.0612	0.0559	0.0442	0.0488	0.0518

Tablo 2: $k=3$, $m=5$ için testlerin deneysel I.Tip hata oranları.

n_1, n_2, n_3	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	GCT	GWT	AFT	DKT	DAFT	YFT1	YFT2	PBT
(7;7;7)	1;1;1	0.0502	0.4380	0.1637	-	-	-	-	0.0317
	1;2;4	0.1032	0.4502	0.1874	-	-	-	-	0.0465
	1;4;8	0.1151	0.4649	0.2142	-	-	-	-	0.0567
(15;15;15)	1;1;1	0.0537	0.1368	0.0783	0.0639	0.0423	0.0197	0.0346	0.0504
	1;2;4	0.0913	0.1401	0.0812	0.0661	0.0453	0.0219	0.0338	0.0469
	1;4;8	0.0982	0.1524	0.0968	0.0803	0.0597	0.0320	0.0448	0.0549
(30;30;30)	1;1;1	0.0472	0.0789	0.0566	0.0524	0.0411	0.0262	0.0374	0.0462
	1;2;4	0.0846	0.0871	0.0669	0.0618	0.0520	0.0364	0.0470	0.0528
	1;4;8	0.0892	0.0933	0.0693	0.0650	0.0547	0.0379	0.0479	0.0499
(7;11;15)	1;1;1	0.0486	0.2790	0.1748	-	-	-	-	0.0834
	1;2;4	0.0144	0.2142	0.1146	-	-	-	-	0.0519
	1;4;8	0.0122	0.2013	0.1013	-	-	-	-	0.0448
	4;2;1	0.4396	0.3539	0.2491	-	-	-	-	0.0869
(7;19;30)	1;1;1	0.0488	0.2769	0.2282	-	-	-	-	0.1140
	1;2;4	0.0032	0.1857	0.1358	-	-	-	-	0.0800
	1;4;8	0.0026	0.1435	0.0973	-	-	-	-	0.0586
	4;2;1	0.6911	0.3278	0.2820	-	-	-	-	0.0889
(15;23;30)	1;1;1	0.0497	0.1079	0.0753	0.0626	0.0499	0.0287	0.0427	0.0515
	1;2;4	0.0161	0.0910	0.0606	0.0559	0.0423	0.0248	0.0382	0.0450
	1;4;8	0.0178	0.1004	0.0696	0.0671	0.0522	0.0337	0.0458	0.0523
	4;2;1	0.3253	0.1365	0.1001	0.0778	0.0624	0.0345	0.0441	0.0521

Tablo 3: $k=5$, $m=2$ için testlerin deneysel I.Tip hata oranları.

$n_1, \dots, n_5$	$\sigma_1, \dots, \sigma_5$	GCT	GWT	AFT	DKT	DAFT	YFT1	YFT2	PBT
(7;7;7;7;7)	1;1;1;1;1	0.0510	0.2178	0.1386	0.0547	0.0394	0.0134	0.0185	0.0444
	1;1;2;4;4	0.0926	0.2263	0.1543	0.0677	0.0518	0.0197	0.0263	0.0523
	1;1;4;8;8	0.0983	0.2386	0.1634	0.0742	0.0565	0.0250	0.0318	0.0526
(15;15;15;15;15)	1;1;1;1;1	0.0494	0.1092	0.0839	0.0572	0.0493	0.0235	0.0415	0.0503
	1;1;2;4;4	0.0915	0.1107	0.0862	0.0586	0.0495	0.0265	0.0407	0.0476
	1;1;4;8;8	0.0996	0.1128	0.0858	0.0619	0.0514	0.0293	0.0437	0.0486
(30;30;30;30;30)	1;1;1;1;1	0.0493	0.0746	0.0643	0.0527	0.0478	0.0333	0.0446	0.0488
	1;1;2;4;4	0.0869	0.0824	0.0712	0.0588	0.0527	0.0367	0.0493	0.0527
	1;1;4;8;8	0.0957	0.0814	0.0710	0.0580	0.0511	0.0361	0.0471	0.0498
(7;7;11;15;15)	1;1;1;1;1	0.0484	0.1686	0.1259	0.0652	0.0514	0.0215	0.0263	0.0519
	1;1;2;4;4	0.0244	0.1466	0.1052	0.0558	0.0449	0.0174	0.0225	0.0489
	1;1;4;8;8	0.0238	0.1417	0.1047	0.0561	0.0441	0.0191	0.0260	0.0476
	4;4;2;1;1	0.2994	0.1868	0.1479	0.0794	0.0661	0.0288	0.0333	0.0523
(7;7;14;20;20)	1;1;1;1;1	0.0524	0.1623	0.1308	0.0715	0.0603	0.0271	0.0302	0.0568
	1;1;2;4;4	0.0173	0.1265	0.0982	0.0503	0.0419	0.0167	0.0203	0.0463
	1;1;4;8;8	0.0148	0.1252	0.0964	0.0514	0.0427	0.0182	0.0225	0.0470
	4;4;2;1;1	0.4022	0.1801	0.1473	0.0739	0.0642	0.0274	0.0298	0.0500
(15;15;23;30;30)	1;1;1;1;1	0.0453	0.0855	0.0707	0.0526	0.0468	0.0272	0.0401	0.0453
	1;1;2;4;4	0.0273	0.0857	0.0724	0.0554	0.0497	0.0303	0.0448	0.0515
	1;1;4;8;8	0.0265	0.0879	0.0740	0.0555	0.0491	0.0297	0.0437	0.0503
	4;4;2;1;1	0.2506	0.0981	0.0833	0.0625	0.0552	0.0304	0.0444	0.0493

Tablo 4: $k=5$, $m=5$ için testlerin deneysel I.Tip hata oranları.

$n_1, \dots, n_5$	$\sigma_1, \dots, \sigma_5$	GCT	GWT	AFT	DKT	DAFT	YFT1	YFT2	PBT
7,7,7,7,7	1;1;1;1;1	0.0505	0.6358	0.3412	-	-	-	-	0.0282
	1;1;2;4;4	0.1114	0.6345	0.3729	-	-	-	-	0.0411
	1;1;4;8;8	0.1244	0.6512	0.3863	-	-	-	-	0.0532
15,15, 15,15, 15	1;1;1;1;1	0.0504	0.1909	0.1137	0.0743	0.0462	0.0088	0.0327	0.0486
	1;1;2;4;4	0.0991	0.1959	0.1209	0.0776	0.0523	0.0133	0.0380	0.0494
	1;1;4;8;8	0.1092	0.1999	0.1240	0.0847	0.0565	0.0152	0.0399	0.0509
30,30,30,30,30	1;1;1;1;1	0.0498	0.0973	0.0732	0.0595	0.0455	0.0180	0.0414	0.0462
	1;1;2;4;4	0.0955	0.0975	0.0721	0.0597	0.0472	0.0187	0.0420	0.0465
	1;1;4;8;8	0.0958	0.1029	0.0763	0.0636	0.0501	0.0211	0.0440	0.0486
7,7,11,15,15	1;1;1;1;1	0.0468	0.4414	0.3181	-	-	-	-	0.0616
	1;1;2;4;4	0.0089	0.3797	0.2500	-	-	-	-	0.0448
	1;1;4;8;8	0.0074	0.3647	0.2354	-	-	-	-	0.0370
	4;4;2;1;1	0.6170	0.4951	0.3870	-	-	-	-	0.0750
7,7,14,20,20	1;1;1;1;1	0.0472	0.4284	0.3384	-	-	-	-	0.0684
	1;1;2;4;4	0.0044	0.3416	0.2513	-	-	-	-	0.0439
	1;1;4;8;8	0.0051	0.3209	0.2280	-	-	-	-	0.0437
	4;4;2;1;1	0.7690	0.4711	0.3953	-	-	-	-	0.0826
15,15,23,30,30	1;1;1;1;1	0.0478	0.1421	0.1023	0.0675	0.0497	0.0145	0.0383	0.0467
	1;1;2;4;4	0.0134	0.1298	0.0902	0.0639	0.0470	0.0132	0.0363	0.0481
	1;1;4;8;8	0.0148	0.1299	0.0905	0.0688	0.0501	0.0138	0.0413	0.0522
	4;4;2;1;1	0.4252	0.1653	0.1255	0.0854	0.0662	0.0207	0.0451	0.0525

Grup sayısı $k=3$, $m=2$ ve bağımsız değişken sayısı $p=1$ için hazırlanan Tablo 1 incelendiğinde; Örnek çapları eşit olduğu durumlarda; GCT testinin I. tip hata oranı beklenildiği üzere varyansların eşit olduğu her durumda $\alpha=0.050$ değerine yakın sonuçlar verdiği, ancak varyanslar arasındaki fark arttıkça; nominal değerden uzaklaştığı görülmektedir. GWT testinin ise deneysel I. tip hata oranı varyansın her durumunda nominal değerden uzaklaştığı, DKT, DAF, YFT1, YFT2 testlerinin ise varyanslar eşit

olduğu ya da birbirine yakın olduğu durumlarda nominal değerden çok düşük sonuçlar verdiği görülmektedir. Örnek çapları arttıkça, asimptotik testlerin hepsinin deneysel I. tip hata oranlarının nominal değere yaklaştığı olduğu görülmektedir.

Örnek çapları farklı olduğu durumlarda; küçük örnek çaplarında GCT testinin deneysel I. tip hata oranının, varyanslar eşit olduğu durumda nominal değere yakın iken, örnek çapları ile varyans değerleri birbiriyle doğru orantılı olduğu durumlarda nominal değerden oldukça küçük,

örnek çapları ile varyans değerleri birbiriyle ters orantılı olduğunda durumlarda ise nominal değerden oldukça yüksek sonuçlar verdiği gözlenmiştir. AFT ve DKT testlerinin deneysel I. tip hata oranları örnek çapları ile varyans değerleri birbiriyle ters orantılı olduğu durumlarda 0.050 sınır değerini aştığı, GWT testinin ise her durumda nominal değerden uzak sonuçlar verdiği gözlenmiştir. PB testinin ise deneysel I. tip hata oranı, her durumda nominal değere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Örnek çapları arttığında, DAFT, YFT1, YFT2 testlerinin deneysel I. tip hata oranları nominal değere yakın sonuçlar vermektedir. PB testinin deneysel I. tip hata oranı ise her durumda nominal değere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bağımsız değişken sayısının artırıldığı durum için hazırlanan Tablo 2 incelendiğinde; Eşit örnek çapları durumlarında GCT, GWT, AFT ve DKT testlerinin deneysel I. tip hata oranlarının nominal değerden oldukça uzaklaştığı görülmektedir. DAF, YFT1, YFT2 ve PB testlerin deneysel I. tip hata oranları ise α değerine yakın sonuçlar vermektedir. Örnek çapları farklı ve küçük iken, DKT, DAFT ve YFT1 testlerinin hesaplanamadığı, PB testinin ise deneysel I. tip hata oranının varyansın farklı durumları için 0.050 sınır değerini aştığı görülmektedir.

Grup sayısının artırıldığı durum için hazırlanan Tablo 3 incelendiğinde; Eşit örnek çapları için GCT, GWT ve AFT testlerinin deneysel I. tip hata oranları büyük örnek çaplarında bile $\alpha=0.050$ değerinden uzak sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Diğer testlerin ise deneysel I. tip hata oranları $\alpha=0.05$ değerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Farklı örnek çapları için k grup sayısının artmasıyla birlikte GWT ve AFT testlerinin deneysel I. tip hata oranları, varyansların her durumunda ve büyük örnek çaplarında bile $\alpha=0.050$ değerinden uzak sonuçlar verdiği görülmektedir. Örnek çapları ile varyans değerleri ters orantılı olduğu durumlarda DAFT testinin de deneysel I. tip hata oranının $\alpha=0.050$ değerinden uzak sonuçlar verdiği görülmektedir. YFT1, YFT2 ve PB testlerinin deneysel I. tip hata oranları ise $\alpha=0.050$ değerine yakın sonuçlar vermektedir.

Hem grup sayısı hem de bağımsız değişken sayısı artırıldığı durum için hazırlanan Tablo 4 incelendiğinde; Örnek çapları ve varyansların tüm durumlarında, GWT ve AFT testlerinin deneysel I. tip hata oranları $\alpha=0.050$ değerinden uzak, YFT1 testinin deneysel I. tip hata oranı ise $\alpha=0.050$ değerinden oldukça küçük sonuçlar verdiği görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, varyansların eşit olmadığı durumlarda k grup regresyon modelinin eşitliğinin testi problemi ele alınmıştır. Bu problem için literatürde yaygın olarak kullanılan Genelleştirilmiş Chow testi (GCT), Genelleştirilmiş Wald testi (GWT), Ağırlıklı F Testi (AFT), Düzeltilmiş Ki-Kare Testi (DKT), Düzeltilmiş Ağırlıklı F Testi (DAFT), yeni F Testi I (YFT1), yeni F Testi II (YFT2) ve Parametrik Bootstrap testi (PBT) ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, grup sayısı $k=3$ ve $k=5$, bağımsız değişken sayısı $p=1$ ve $p=4$, örnek çapları ve hata varyanslarının eşit ve farklı kombinasyonları dikkate alınarak kapsamlı bir simülasyon çalışmasıyla bu testlerin deneysel I. tip hata oranları bakımından karşılaştırılması

yapılmıştır. Simülasyon çalışmasına göre, DKT, DAFT, YFT1 ve YFT2 testlerinin teorik yapısından dolayı $p > 2$ iken küçük örnek çapları durumunda kullanılamadığı görülmektedir. GCT, AFT özellikle GWT testlerinin çoğu durumda deneysel I. tip hata oranı değerlerinin nominal değerden oldukça büyük çıktığı görülmektedir. PB testi ise örnek çapları ve varyanslar birbiriyle ters orantılı olduğu durumlarda nominal değerden biraz uzaklaştığı görülmektedir. Bunun dışında ise diğer testlere göre örnek çapı, grup sayısı ve değişken sayısına bakmaksızın nominal değere en yakın sonuç veren test olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, heterojen varyans varsayımı altında k grup regresyon modelinin katsayılarının eşitliği testinde yaygın olarak kullanılan testlerin özellikle küçük ve farklı örnek çaplarında varyanslar arasındaki fark arttıkça deneysel I. tip hata oranı bakımından çok iyi sonuç vermediği yapılan simülasyon çalışmasıyla gösterilmiştir. Uygulamada, özellikle de ekonomik ve tıbbi uygulamalarda yüksek örnek çaplarıyla çalışmak çok gerçekçi bir durum değildir. Dolayısıyla özellikle küçük örnek çaplarında daha iyi deneysel I. tip hata oranı elde etmek bu tarz verilerin analizinde elde edilen sonuçların güvenilirliğini artıracaktır. Bu amaçla sonraki çalışmalarda özellikle küçük örnek çapında var olan testlerden daha iyi deneysel I. tip hata oranı değerine sahip yeni yaklaşımlara dayalı test istatistiği üzerinde durulması uygun olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI

Faik Ümit Diri: Kavramsal tasarım, metodoloji, yazma, düzenleme, kaynaklar.

Fikri Gökpinar: Metodoloji, deneysel çalışmalar, yazılım, denetim, onaylama.

Esra Gökpinar: Veri düzenleme, gözden geçirme ve düzenleme.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Chow, "Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions", *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 591-605, doi.org/10.2307/1910133.
- [2] T. Toyoda, "Use of the Chow test under heteroscedasticity", *Econom. J. Econom. Soc.*, 601-608, 1974, doi.org/10.2307/1911796.
- [3] W. A. Jayatissa, "Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions when disturbance variances are unequal", *Econometrica*, c. 45, sy 5, 1977, doi.org/10.2307/1914075.
- [4] Goldfeld, S. M. ve Quandt, "Asymptotic tests for the constancy of regressions in the heteroskedastic case", Research Memorandum No, 229, Econometric Research Program, Princeton University."
- [5] P. A. Watt, "Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions when disturbance variances are unequal: some small sample properties", *Manch. Sch.*, c. 47, sy 4, ss. 391-396, 1979, doi:10.1111/j.1467-9957.1979.tb01363.x.
- [6] M. M. Ali ve J. L. Silver, "Tests for equality between sets of coefficients in two linear regressions under heteroscedasticity", *J. Am. Stat. Assoc.*, c. 80, sy 391, ss. 730-735, 1985, doi:10.1080/01621459.1985.10478176.
- [7] H. Tsurumi ve N. Sheflin, "Some tests for the constancy of regressions under heteroscedasticity", *J. Econom.*, c. 27, sy 2, ss. 221-234, 1985, doi.org/10.1016/0304-4076(85)90089-2.
- [8] Y. Honda ve H. Ohtani, "Modified wald tests in tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions under heteroscedasticity", *Manch. Sch.*, c. 54, sy 2, ss. 208-218, Haz. 1986, doi: 10.1111/j.1467-9957.1986.tb01266.x.

[9] S. Weerahandi, "Testing regression equality with unequal variances", *Econometrica Journal of the Econometric Society*, 1211-1215, 1987, doi.org/10.2307/1911268.

[10] J. G. Thursby, "Misspecification, heteroscedasticity, and the Chow and Goldfeld-Quandt tests", *Rev. Econ. Stat.*, ss. 314-321, 1982, doi.org/10.2307/1924311.

[11] R. Wilcox, "Comparing the slopes of two independent regression lines when there is complete heteroscedasticity", *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 50(2), 309-317, 1997, doi.org/10.1111/j.2044-317.1997.tb01147.x

[12] E. Moreno, F. Torres, ve G. Casella, "Testing equality of regression coefficients in heteroscedastic normal regression models", *J. Stat. Plan. Inference*, c. 131, sy 1, ss. 117-134, 2005, doi.org/10.1016/j.jspi.2003.12.016

[13] D. Oberhelman ve R. Kadiyala, "A test for the equality of parameters for separate regression models in the presence of heteroskedasticity", *Commun. Stat. Simul. Comput.*, c. 36, sy 1, ss. 99-121, Oca. 2007, doi: 10.1080/03610910601096338.

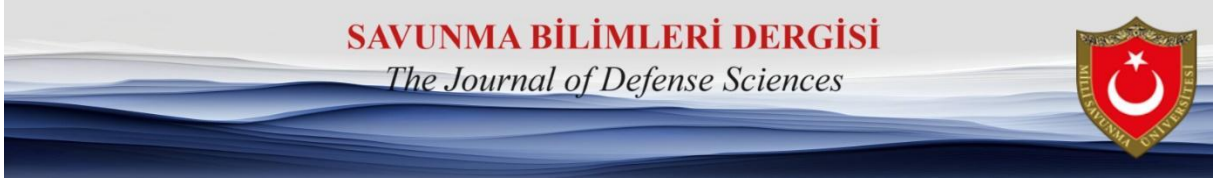
[14] M. A. Koschat ve S. Weerahandi, "Chow-type tests under heteroscedasticity", *J. Bus. Econ. Stat.*, c. 10, sy 2, ss. 221-228, Nis. 1992, doi: 10.1080/07350015.1992.10509901.

[15] Yazıcı. M., Gökpınar, F., Gökpınar, E., Ebeğil, M., ve Özdemir, Y. (2021). A computational approach test for comparing two linear regression models with unequal variances", *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 50(6), 1756-1772, doi.org/10.15672/hujms.784623

[16] J.-M. Dufour, "Generalized Chow tests for structural change": A coordinate-free approach", *Int. Econ. Rev.*, ss. 565-575, 1982, doi.org/10.2307/2526374

[17] Y. Y. MAY, "Some new methods for comparing several sets of regression coefficients under heteroscedasticity", *Yüksek Lisans Tezi, Department Of Statistics And Applied, Probability, National University of Singapore*, 2012.

[18] S. M. Sadooghi-alvandi, A. A. Jafari, ve H. A. Mardani-Fard, "Comparing several regression models with unequal variances", *Commun. Stat. Simul. Comput.*, c. 45, sy 9, ss. 3190-3216, Ekim 2016, doi: 10.1080/03610918.2014.930899.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Kömür Kullanımı ile Üretilen Enerji Miktarının Yapay Sinir Ağı Modeliyle Tahmini: Çin Üzerine Örnek Uygulama

Estimation of the Amount of Energy Produced by Coal Use With Artificial Neural Network Model: Example Application on China

Mehmet Hurşut GÜVEN^{1*} Faruk KILIÇ² Faik Ümit DİRİ³

¹Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Milli Güvenlik Enstitüsü, Harp Silah ve Araçları Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Milli Savunma Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10.06.2024
Düzeltilme: 10.09.2024
Kabul: 11.10.2024

Keywords

Artificial Neural
Network
Electric Production
Coal
China

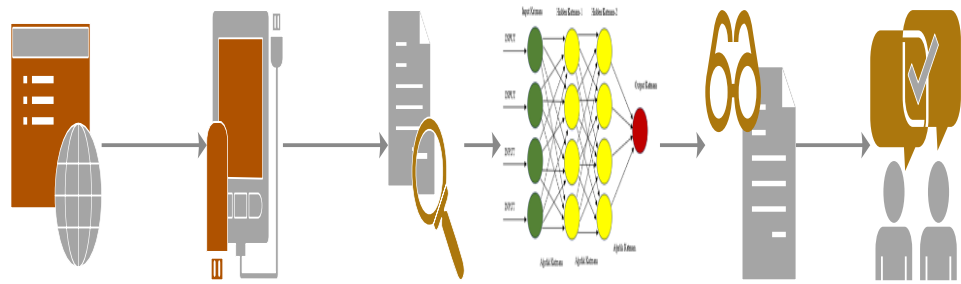
Anahtar Kelimeler

Yapay Sinir
Ağı
Elektrik Üretimi
Kömür
Çin

Önemli Noktalar

YSA (Yapay Sinir Ağı) son dönemlerde verilerin analizinde ve analiz edilen verilerden farklı bir verinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar gerçek değerler ile oldukça yakındır.

Şekilsel Özet



Özet

Son yıllarda çevresel etkilerinden dolayı fosil yakıtların; özellikle de kömürün yakılması ile elektrik üretimi terkedilerek yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ağırlık verilmektedir. Bu eğilim Çin özelinde incelendiğinde, 2007 yılı sonrasında kömür kullanılarak elektrik üretiminin azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Bu çalışmada Çin’de hydropower (su gücü), rüzgar gücü, nükleer güç ve toplam elektrik üretim miktarları input verisi olarak kullanılarak kömür yakılarak üretilen elektrik miktarları 2000-2020 yılları için Yapay Sinir Ağı (YSA) aracılığı ile tahmin çalışması yapılmıştır. Yapay zekanın alt parçalarından olan YSA belirsizlik ve değişkenlik içeren sorunların çözüme oldukça uygun olduğu tespit edilmiştir. Çin’de kömürden elde edilen elektrik üretimi tahminine yönelik olarak yapılan YSA analiz sonucunda; Training, Validation, Test ve All için regresyon değerleri sırası ile 0,99958, 1, 1, ve 0,99961 olarak belirlenmiştir. Ayrıca analiz sonucunda yapılan tahmine yönelik olarak hata miktarların hesaplanması farklı yöntemler ile yapılmış ve MAE için 0,017, MAPE için % 1,7, MAD için 352,619, MSE için 358772,14 ve RMSE için ise 598,9759 sonuçları bulunmuştur.

Abstract

In recent years, due to their environmental effects of fossil fuels; In particular, electricity generation by burning coal is abandoned and emphasis is placed on the use of renewable energy sources. When this trend is examined specifically in China it is seen that electricity production using coal has started to decrease after 2007. In this study, the amounts of electricity produced by burning coal in China were tried to be estimated through Artificial Neural Network (ANN) for the years 2000-2020, using hydropower, wind power, nuclear power and total electricity production amounts as input data. ANN, one of the sub-parts of artificial intelligence, is very suitable for solving problems involving uncertainty and variability. As a result of the ANN analysis conducted for the estimation of electricity production from coal in China; Regression values for Training, Validation, Test and All were determined as 0.99958, 1, 1 and 0.99961 respectively. In addition, the error amounts were calculated for the prediction made as a result of the analysis and results were found to be 0.017 for MAE, 1.7% for MAPE, 352.619 for MAD, 358772.14 for MSE and 598.9759 for RMSE.

*Corresponding author, e-mail: mhguven@kho.msu.edu.tr

DOI: 10.17134/khosbd.1499159

Elektronik/Online ISSN: 2148-1776

Basılı/Printed ISSN: 1303-6831

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji tüketim miktarı bir devletin refah seviyesini gösterdiği gibi aynı zamanda, o devletin sosyal ve ekonomik gelişimi içinde oldukça büyük öneme sahiptir. Geleneksel olarak en yoğun enerji üretimi petrol, kömür, doğal gaz gibi kaynaklar kullanılarak gerçekleşmektedir. Fakat bu kaynaklar kaçınılmaz olarak iklim değişikliği, çevresel sorunlar, ozon tabakasının yok oluşu gibi yan etkilere sahiptir. Ayrıca, fosil yakıtlar yenilenebilir olmadıkları için kullanıldıkça tükenmeye doğru gitmektedirler [1,2].

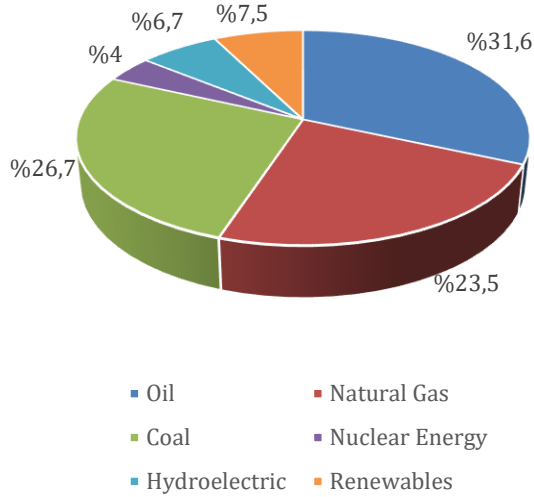
Endüstriyel devrim ve ekonomik gelişim ile birlikte enerji tüketimi artmıştır. İnsanlığın enerji ihtiyacı artmış enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesine yönelik çalışmalar sonucunda 1861 yılında ABD’de açılan ilk petrol kuyusu açılmış ve sonrasında ham petrol ilk arabanın üretimi ve sonrasında motorlu araçların yaygınlaşması ile en önemli enerji üretme malzemelerden biri haline gelmiştir[3].

Doğal gaz ve ham petrolün dünyanın sadece belirli bölgelerinde bulunması ve siyasi, ekonomik kargaşalar sırasında fiyatlarında meydana gelen aşırı değişiklikler, nükleer enerji atıklarının kontrol edilmesi ve beklenmeyen kazalar, yenilenebilir enerjilerin yüksek maliyeti gibi sebeplerden dolayı insanlığın en eski enerji kaynaklarından olan kömür halen enerji üretiminde oldukça önemlidir[4].

Kömür yakılarak elektrik enerjisi üretmenin, oluşan kül atığı ve bunun sebep olduğu verim düşüklüğü, çevre sorunları ve bakım maliyetleri gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Yanma sonrasında kömürün bünyesinde yer alan

inorganik malzemeler yine inorganik buhar, sıvılar ve katı malzemelere dönüşmektedir. Oluşan bu gaz, sıvı ve katı atıklar toksik ve çevre açısından zararlı atıklardır[5]. Uluslararası Enerji Birliğinin verilerine göre Covid 19 pandemisinin etkisi ile 2019 ilk çeyreğine göre 2020 yılındaki kömür ve petrole olan talep sırası ile % 8 ve % 5 oranında düşmüştür. Bu durumun diğer sebebi ise fosil yakıtların dünya üzerindeki yaşama ve atmosferdeki karbondioksit (CO₂) gibi gazların artmasına yol açtığından yenilenebilir enerji kaynaklarına birkaç on yıldır önemli bir kayma gerçekleşmiştir. Kullanılan fosil yakıtların çevre üzerindeki etkisinin azaltılması için kullanılan yakıtın azaltılması yanında enerjinin daha verimli kullanılması, verimli enerji çevrim cihazlarının geliştirilmesi, gibi önlemler zehirli gazların salınımını azaltmaktadır[6].

Dünya üzerinde hızla artan insan nüfusu ile birlikte enerjiye talep artmaktadır. Artan bu talebi karşılayabilmek ve fosil yakıtların çevre üzerinde oluşturduğu baskının azaltılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim başlamıştır[3,7]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş panelleri, rüzgâr, jeotermal, su gücü gibi tekrar üretilebilen kaynaklar bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin tüketiminin gelecek 30 yılda % 147 büyümesi beklenmektedir[8,9].



Şekil 1: 2022 Yılı için Dünya enerji tüketimi[10].

Enerji üretiminde kullanılan kaynaklar 2022 yılı istatistiki verileri Şekil 1.'de verilmiştir[10]. Şekil-1 incelendiğinde 2022 yılı için elektrik üretim kaynakları olarak halen %81,8 ile fosil yakıtlar en büyük kaynağı oluşturmaktadır. Nükleer Enerji santralleri aracılığı ile üretilen enerji miktarı ise %4 olarak gerçekleşmiştir. Hydropower (su gücü)'de eklendiğinde yenilenebilir enerji kaynakları ile elde edilen elektrik enerjisi oranı %14,2 olarak gösterilmiştir. Enerji kaynaklarındaki değişimin gerek çevresel etkiler gerekse maliyet gibi sebepler nedeni ile önümüzdeki yıllarda değişmesi beklenmektedir. Bu değişimin oranının geleceğe yönelik olarak tahmin edilebilmesi için istatistiksel ve yapay sinir ağları (ANN) yöntemleri kullanılarak son yıllarda oldukça fazla çalışma yapılmıştır.

Yapay sinir ağları yapay nöronların bir araya gelmesi ile oluşan hesaplama yöntemidir. Yapay sinir ağını oluşturan nöronlar kendi başlarına (aktivasyon fonksiyonu) sonuç vermektedir. Yapay sinir ağına aldığı sonucu belirleyen; nöronlar arasındaki bağlantı, bu bağlantıların

ağırlıkları ve nöronların herbirinden elde edilen sonuçlardır. Yapay sinir ağları yöntemi genel olarak lineer olmayan, belirsiz ve konveks olmayan sistemler ile ilgilenmektedir[11-15].

Enerji üretiminde faydalanan kaynaklardan başlıcaları yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlar ve nükleer enerjidir. Kriz dönemlerinde her ülke enerji temininde sorunlar yaşamaktadır; özellikle 1973 yılında gerçekleşen enerji krizi başta olmak üzere enerji arzında meydana gelen sorunlar nedeni ile enerji sistemlerinde enerji tüketimi oldukça önemlidir. Hangi sektörün ne kadar enerji tükettiğinin takibi zor olmakla beraber YSA kullanarak dağılımın tahmin edilebilmesi mümkündür. YSA, politika yapıcıların özellikle kriz dönemlerin enerji politikaları konusunda karar vermesine katkı sunabilmektedir[16,17]. Yapay zekâ, enerji yönetiminin otomasyonu için oldukça önemli role sahiptir. Yapay zekâ ile erişilebilen enerji miktarı, enerji programlanması, talep miktarı ve enerji ticareti üzerine tahmin yapılmaktadır. Yapay sinir ağı ve vektör makineleri yapay zekânın bu konuda kullandığı araçlar olmaktadır[18,19].

Olabi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada termal enerjinin depolanmasına, optimizasyonuna ve kontrolüne yönelik olarak yapay zekâ kullanılarak tahmin edilmesi için çalışma yapılmıştır. Enerji sistemlerinin sınıflandırılması, rolü ve enerji sistemlerinin farklı yapay zeka yaklaşımları kullanılarak oluşturulan uygulamaların tasarlanması için çalışılmıştır[6].

Kılıç tarafından yapılan çalışmada G8 üyesi ve Avrupa ülkesi olan Almanya'nın toplam Rüzgâr ve Güneş Enerjisi Toplam Kapasitesi (WSEC) ve Rüzgâr ve Güneş Enerjisi toplam üretim (WSEG)

değerleri Yapay Sinir Ağları kullanılarak tahmin edilmiştir. Nüfus, işsizlik, GSYH büyümesi ve toplam yenilenebilir enerji parametreleri girdi değişkenleri olarak kullanılmıştır. Yapay sinir ağı tarafından hesaplanan WSEC ve WSEG analizi sonucunda eğitim ve test regresyonları sırası 1 ve 0,99988 olmuştur[20].

MATLAB programının yapay zekâ modülü kullanılarak endüstriyel binaların enerji verimliliğinin artırılmasının bu binalardaki enerji tüketimine olan etkisi Zhao tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yapay zekâ temelli enerji koruma sistemlerinin enerji tüketimine olumlu katkısı olduğu görülmüştür[18].

Enerji ve enerji tüketim indisinin analizinin modellenmesine yönelik yapılan çalışmada Yapay Sinir Ağı yani Yapay Zekâ kullanılmıştır. Bu çalışmada enerji tüketim miktarı ve enerji indisi modellenmiş ve miktarları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Analiz sonucunda hata kriterine göre yüksek doğrulukta ve analiz test değeri $R^2 = 0,98$ bulunmuştur. Enerji tüketim indisini ve yakıt tüketimini düşürmek için kullanılan kompresörlerin veriminin artırılması için farklı metotlar sunulabilir[16].

Bu çalışmalar dışında da Yapay Sinir Ağları kullanılarak yapılmış olan birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan Khamehchi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ağır yağ

(dead oil) vizkozitesi hesaplanmaya çalışılmıştır[21]. Salehar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise kömür kalitesinin kömür kullanarak elektrik üreten tesislerde oluşan sorunlara etkisi YSA kullanılarak incelenmiştir[5]. Yapılan bir diğer çalışmada Türkiye’de kömür kullanılarak enerji üretilen tesislerinin veriminin artırılması Yapay Sinir Ağı kullanılarak incelenmiştir[4]. Tedarik zinciri yönetiminin optimizasyonuna yönelik olarak Soori ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Yapay Zekâ yöntemi olan Yapay Sinir Ağlar kullanılmıştır (Artificial Neural Network). Dozic ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise Avrupa Birliğinin enerji politikalarının uzun dönemli olarak tahminine yönelik olarak yapay sinir ağları kullanılmıştır[22]. Bas ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise medyan dentritik yöntemi kullanılarak yapılan Yapay Sinir Ağları analizi ile yıllara dağılmış olarak tahmini üzerine çalışma yapılmıştır[23]. Egrioglu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise bulanık resimlerin tanımlanması, modellenmesi ve tahmini için yeni yapay sinir ağı modeli geliştirilmesine yönelik olarak çalışılmıştır[24]. Birleşmiş güç döngüsü ve soğutma sistemlerinde CO₂’nin dinamik davranışının tahminine yönelik olarak He ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Yapay Sinir Ağlarının ve Yapay Sinir Ağlarında yer alan modellerin karşılaştırılmasına yönelik çalışma yapılmıştır[25].

Tablo 1: Çalışmada yer verilen makalelerin özeti.

Referans	Veri Sistemi	YSA rolü	YSA kullanmanın amacı	Özet
Olabi ve arkadaşları [6]	Termal enerji depolama sistemleri	Tahmin	Termal enerji depolama sistemlerinin tahmin, optimizasyon ve kontrolü	YSA, konvansiyonel sistemler ile karşılaştırıldığında sahip olduğu esneklik ve ucuzluk gibi avantajlarının yanı sıra tahmin konusunda konvansiyonel sistemlerden daha iyi performans sergilemektedir.
Kılıç [20]	Elektrik üretimi	Tahmin	Almanya için güneş ve rüzgâr ile Elektrik üretim kapasitesinin tahmini	Yapılan tahmini etkileyen çok sayıda parametre olmasına rağmen, YSA metodu ile yüksek doğrulukta tahmin edilmiştir.
Zhao[18]	Binaların enerji dostu sistemlerinin yönetimi	Tahmin	Endüstriyel binaların enerji tüketimi verimlerinin geliştirilmesi	Yapılan çalışma ile geliştirilen enerji tasarrufu yönetim sistemi modelinin olumlu katkı sağladığı görülmüştür.
Sarvestani ve arkadaşları [16]	Binalarda enerji tüketiminin indirgenmesi	Optimizasyon	Endüstriyel tesislerdeki enerji tüketiminin azaltılması için yeni metodun geliştirilmesi	Yapılan çalışma ile geliştirilen metod yüksek doğrulukta olduğu görülmüştür.
Khamehchi ve arkadaşları [21]	Hafif ve orta ölü petrol sistemlerinin viskozitesi	Modelleme	Pertol çıkarma veriminin geliştirilmesi	YSA metodu ile geliştirilen metod diğer yöntemler ile elde edilenlerden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.
Salehfar ve arkadaşları [5]	Kömür atıklarındaki kül oluşumu	Tahmin	Kömürden Elektrik üreten tesislerin kül üretme miktarının tahmini	Geliştirilen yeni model geleneksel yöntemlere göre hızlı, verimli ve ekonomik olduğu görülmüştür.
Dozic ve arkadaşları [22]	Uzun dönemli enerji politikalarının tahmini	Tahmin	Avrupa Birliğinin enerji politikaları kapsamında karbondioksit salımının tahmini	Yapılan analiz kabul edilebilir doğruluk seviyesine sahip olduğu görülmüştür.

Liu ve arkadaşları tarafından Yapay Sinir Ağlarının geliştirilmiş Red Fox Optimizer (IRFO) modeli kullanılarak enerji transfer taleplerine yönelik tahmini üzerine çalışma

yapmışlardır[26]. Enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji üretimine yönelik olarak yapay sinir ağları, makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak uzun dönemli tahmini için Wazirali

ve arkadaşları tarafından çalışma yapılmıştır[27]. Liu ve arkadaşları Yapay Sinir Ağları kullanılarak yenilikçi bir elektrik tüketim tahmini için çalışma yapmışlardır[28].

Knoerzer tarafından yapılan çalışmada basitleştirilmiş adibatik sıkıştırma ısınmasının tahmini için konvansiyonel sayısal yaklaşım ile Yapay Sinir Ağları yöntemleri ile hesaplanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda Yapay Sinir Ağları adiabatik sıkışmalı sistemlerinin ısısının tahmininde etkili olduğunu ve sistemin modellenmesinde esnek ve verimli bir yaklaşıma sunduğu gözlenmiştir[29].

Musadi ve arkadaşları tarafından Kuzey Jakarta'da yerleşik olan Tanjung Priok Limanında yürütülen işlemlerin gerçekleşen gelgit yükselmesinden etkilenmemesi için gelgit miktarının tahminine yönelik çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada Yapay sinir ağı ve karar ağacı algoritması kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda YSA ile elde edilen MSE değerinin karar ağacı algoritmasından elde edilenden daha küçük olduğu görülmüştür[30].

Çin yaklaşık olarak Dünya'da kömürden üretilen elektrik miktarının yarısından sorumludur. Verilere göre 2009 ile 2019 arasında Çin'de 1269 kömürden elektrik üreten santral bulunmaktadır[31]. Kömürün elektrik üretimi dışında klasik şekilde ısınma amaçlı kullanımı da oldukça yaygındır. Son dönemlerde özellikle Çin'in kuzey bölümlerinde kömürün ısınma kaynağı olarak kullanılması nedeni ile bir diğer çevresel etki olan hava kirliliği görülmüştür[32].

Bu çalışmada dünyanın en fazla nüfusuna sahip olan Çin, aynı zamanda sanayileşme oranı, üretim

kapasitesi ve yüksek üretim miktarı nedeni ile incelenmiştir. Yüksek sanayileşme oranı ve üretim kapasitesinin yüksek olması aynı zamanda fazla miktarda enerjiye ihtiyaç duymak anlamına gelmektedir. Bu nedenle Çin'in enerji ihtiyacını karşılayabilmek için yüksek miktarda enerji üretmesi gerekmektedir. Çin, enerji üretiminde kullandığı kaynakları su, rüzgâr, nükleer ve toplam elektrik üretimi kullanılarak; kömürden üretilen elektrik miktarları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 2000 ile 2020 yılları arasında Çin'de hydropower (su gücü), nükleer güç, rüzgâr tribünleri ve toplam elektrik üretimi girdi değerleri input verisi alınarak kömür yakılması sonucunda üretilen elektrik miktarları Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmin çalışmasında kullanılan girdi verilerinden hydropower (su gücü), nükleer güç, rüzgâr tribünlerinden üretilen elektrik enerjisi miktarları ve kömürden üretilen elektrik miktarları Global Energy Monitor[33]'den alınmıştır. Çin'de üretilen toplam elektrik miktarı ise Enerdata[34] kaynağından alınmıştır. Çalışmada kullanılan girdi verileri Tablo-1'de, verilerin grafiği Şekil-2'de verilmiştir.

2.1.1. Veri Paketleri

Çin, petrol kaynakları yetersiz olduğu için Ortadoğu'da bulunan enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Bu durumu değiştirmek adına enerji kaynaklarını çeşitlendirmekte ve çevresel etkiler nedeni ile yenilenebilir enerji kaynaklarına önem vermektedir. Kömür ise sahip olduğu kötü çevresel etki özellikleri nedeni ile

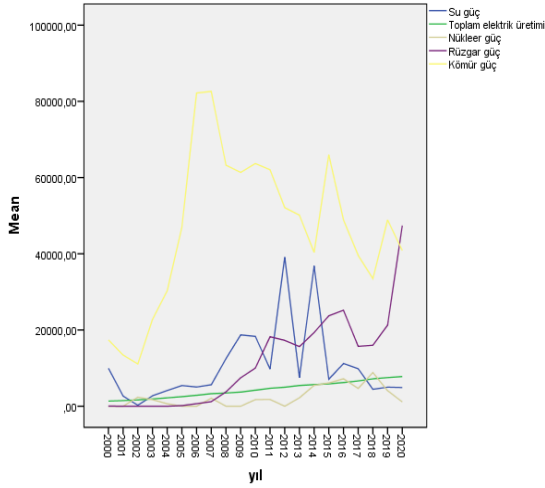
enerji üretiminde terkedilemeye çalışılmaktadır. Çalışmada MATLAB/2021 içerisinde yer alan Yapay Sinir Ağları modülü kullanılmıştır.

Tablo 2 incelendiğinde su gücünden elde edilen elektrik haricinde genel olarak artış gözlenmektedir. Tüm dünyada su sıkıntısı

yaşandığından su gücünden elde edilen elektrik değerlerinin genel olarak azalması beklenen bir durumdur. Düzensiz değerlerin olması tamamen iklimsel değişiklikteki negatifliklerin bir sonucu olarak ifade edilebilmektedir.

Tablo 2: Çin’de üretilen elektrik enerjisi miktarları[34,35].

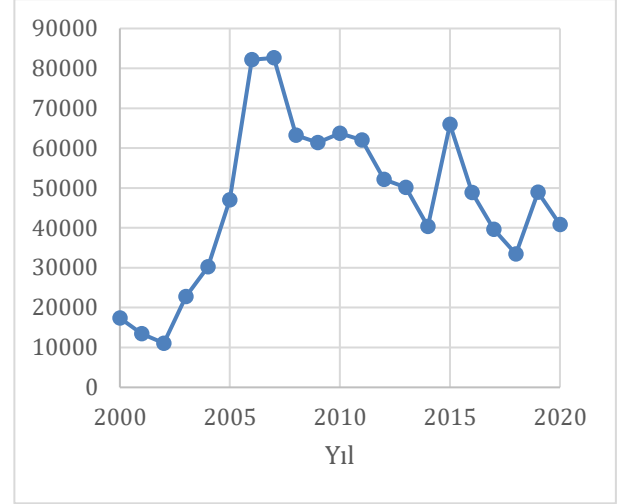
Yıl	Çin’de hydropower (su gücü)’den Üretilen Elektrik MW	Çin’in Toplam Elektrik Üretimi TWh	Çin’de Nükleer Güç ile Üretilen Elektrik MW	Çin’de Rüzgar Gücünden Üretilen Elektrik MW
2000	9960	1355.738	0	21
2001	2682	1480.949	0	0
2002	265	1654.164	2368	0
2003	2746	1910.755	1718	0
2004	4126	2203.502	650	0
2005	5429	2500.466	0	163
2006	5042	2865.954	0	667
2007	5631	3281.79	2120	1206
2008	12488	3467.185	0	3761
2009	18710	3715.061	0	7471
2010	18327	4207.993	1746	10021
2011	9753	4715.761	1771	18227
2012	39099	4994.045	0	17278
2013	7498	5447.247	2218	15638
2014	36805	5678.945	5472	19329
2015	7083	5859.515	6122	23728
2016	11215	6217.967	7205	25177
2017	9833	6635.480	4675	15702
2018	4440	7181.800	8840	15994
2019	5009	7519.345	4086	21253
2020	4903	7797.561	1118	47414



Şekil 2: Çin'de üretilen elektrik enerjisi miktarlarının yıllara göre dağılımı.

Tablo-2 ve Şekil-2 incelendiğinde hydropower (su gücü) ile üretilen elektrik enerjisinde 2010-2015 arasındaki verilerde değişkenlik olmakla beraber genel olarak birbirine yakın değerlerdedir. Nükleer enerji santralleri ile elektrik üretiminde 2005 yılı sonrasında keskin bir artış görülmüştür. Ayrıca, rüzgâr santralleri kullanılarak elektrik üretiminde 2010 sonrasında düzenli artış görülürken 2018 sonrasında sert bir düşüş gerçekleşmiştir. Çin'e ait toplam elektrik üretimi ise 2000 yılı sonrasında daha hızlı yükseliş eğilimi göstermiştir.

Elektrik üretiminde kömür santrallerinin elektrik üretiminde kullanılmasının çevreye olan etkileri nedeni ile diğer kaynakların gelişmesi ile birlikte düşüşe geçmiştir. Şekil incelendiğinde kömürden elektrik üretiminde 2006 yılı sonrasında düşüş trendine girdiği görülmüştür. Yapılan bu çalışmada input verileri kullanılarak Çin'de elektrik üretimi tahmin edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3: Yıllara göre kömür santralleri kullanılarak üretilen elektrik üretimi[33].

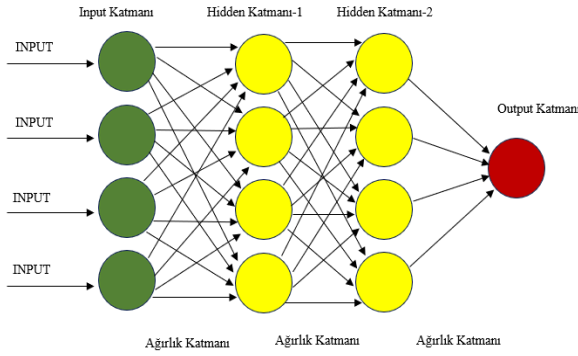
Çin'in enerji üretimi 2000 yılı sonrasında artmakla birlikte Covid 19 salgının başlaması ile 2019 sonrasında enerji talebinde düşüş gözlenmiştir. Yaşanan bu düşüş mevsimsel olmamakla beraber daha önceki yıllarda yaşanan düşüşler gibi dönemsel bir düşüştür.

2.1.2. Yapay Sinir Ağı

İnsan beyin yapısı ve fonksiyonlarının taklit edilerek gerçekleştirilen makine öğrenmesi Yapay Sinir Ağı (YSA) olarak tanımlanabilir. Yapay sinir ağları karmaşık kurallar ve matematiksel formüller yerine insan beyninin öğrenme biçimini taklit eden sistemlerdir. Yapay sinir ağları yığın veri içerisinde anahtar bilgiyi öğrenebilmenin yanı sıra bilgi yığını içinde gürültü durumundaki veriyi temizleyebilme yeteneği sonucunda problemi çözebilmektedir. YSA tahmin yaparken sunduğu yeni metot ile daha önce kayıt altına alınmış olan ve sisteme girilen parametreler kullanılarak kontrollü veya kontrolsüz parametreler arasında ilişki kurabilmektedir[35-37].

Gerçek yaşamdaki gibi Yapay Sinir Ağlarında da tekrarlayan denemeler öğrenme ile

sonuçlanmaktadır[20]. Yapay Sinir Ağları (YSA) kompleks tahmin ve patern sorunlarını çözmek için geliştirilmiştir. Yapay sinir ağlarında girdi katmanı (input layer), gizli katman (hidden layer) ve çıktı katmanı (output layer) olarak 3 katmandan oluşmaktadır. Çok katmanlı yapay sinir ağlarında nöronlar ilk işlemciler olmaları nedeni ile tüm katmanlarda yer almaktadırlar[27].



Şekil 4: Yapay sinir ağı çalışma katmanları.

Yapay Sinir Ağlarının eğitiminde hata miktarını azaltmak için en fazla kullanılan yöntemlerinden biri Back Propagation (BP) sürecidir. Bu tekniğin en önemli dezavantajı bazı özel durumlarda sorun yaşamaya eğilimli olmasıdır. Bu dezavantajlar pattern oluşturulmasında ciddi sorunlara yol açmaktadır. Oluşan sorunların çözümü için çok sayıda teknik önerilmiştir[26].

MATLAB programı kullanılarak yapılan Yapay Sinir Ağı analizinde input verileri programa girilmeden önce normalizasyon uygulanmıştır. Yapılan normalizasyon işlemi ile tüm veriler 0 ile 1 arasındaki eş değerlere indirgenmiştir. Kullanılan formülasyon Eşitlik 1’de verilmiştir. Aşağıda verilen eşitliklerde G_t girdi değerlerini, H_t yapılan tahmin sonucunda bulunan değeri ve n ise veri sayısını göstermektedir.

$$N = \frac{G_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n G_t^2}} \quad (1)$$

Analiz sonucunda elde edilen çıktı değerlerine Eşitlik 2’deki formülasyon kullanılarak tahmin edilen değerlere ulaşılmıştır.

$$H_t = N * \sqrt{\sum_{t=1}^n G_t^2} \quad (2)$$

2.1.3. Hata Ölçüm Parametreleri

Tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki fark hata olarak isimlendirilmektedir. Hata aynı zamanda uygulanan çözümün performansını göstermektedir. Tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farkı gösteren hata değerini hesaplamaya dönük farklı yaklaşımlardır. Bu hata değerleri ne kadar küçük olursa modelin en az hata ile tahmin yaptığını gösterir. Hatanın hesaplanması için Root Mean Square Error (RMSE), Mean Percent Error (MPE), Mean Absolute Deviation(MAD), Mean Absolute Error (MAE) ve Mean Absolute Percentage Error (MAPE) formülleri kullanılmıştır[8], [20]. Hata hesaplamalarında kullanılan formüller Eşitlik 3-7’de verilmiştir. Kullanılan formüllerde G_t girdi değerlerini, H_t yapılan tahmin sonucunda bulunan değeri ve n ise veri sayısını ifade etmektedir.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |H_t - G_t|}{n} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (H_t - G_t)^2}{n} \quad (4)$$

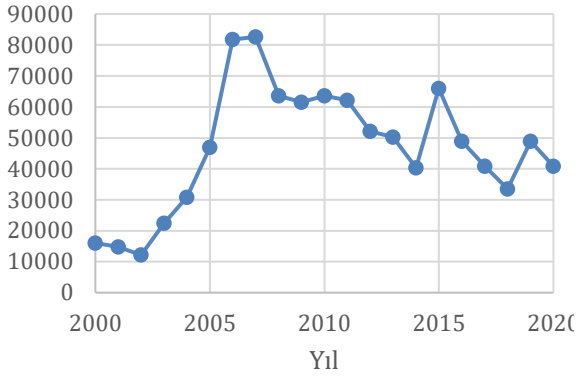
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (H_t - G_t)^2}{n}} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{H_t - G_t}{H} \right|}{n} \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{H_t - G_t}{H_t} \right|}{n} \times 100 \quad (7)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kömürden üretilen enerjini yaklaşık yarısından fazlası sadece Çin tarafından gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5: Çin için kömürden elektrik üretim tahmini (MWh).

Kömürün çevresel etkileri düşünüldüğünde Çin tarafından tüketilen kömürün miktarı önem kazanmaktadır. 2021 yılında dünya ölçeğinde salınan 15.3 milyar ton CO₂'nin yaklaşık %40'ın kömür kullanımı sayesinde gerçekleşmektedir[31]. Kömürün kullanımının sebep olduğu çevresel etkiler nedeni ile kömür kullanım miktarının tahmin edilmesi önemlidir. Kömür kullanım miktarının tahmin edilebilmesi için Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılan yöntemlerden biridir. YSA yöntemi kullanılarak Çin'in kömürden elektrik üretme miktarları Şekil- 5'te verilmiştir. Gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılma grafiği ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 5 üst üste oturmasından dolayı şeklin ve eldelerin daha iyi yorumlanması asabiyle “Çin için kömürden elektrik üretim tahmini” öncelikle sade kısmıyla verilmiştir.

Verilen ve elde edilen değerlere bakıldığında Şekillerin neredeyse üst üste oturduğu görülmektedir. Bu durum regresyon çıktı değerlerinden de anlaşılabileceği gibi çok düşük hata elde edilmiştir.

Yapılan YSA tahminine ait regresyon sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan tahminlere göre

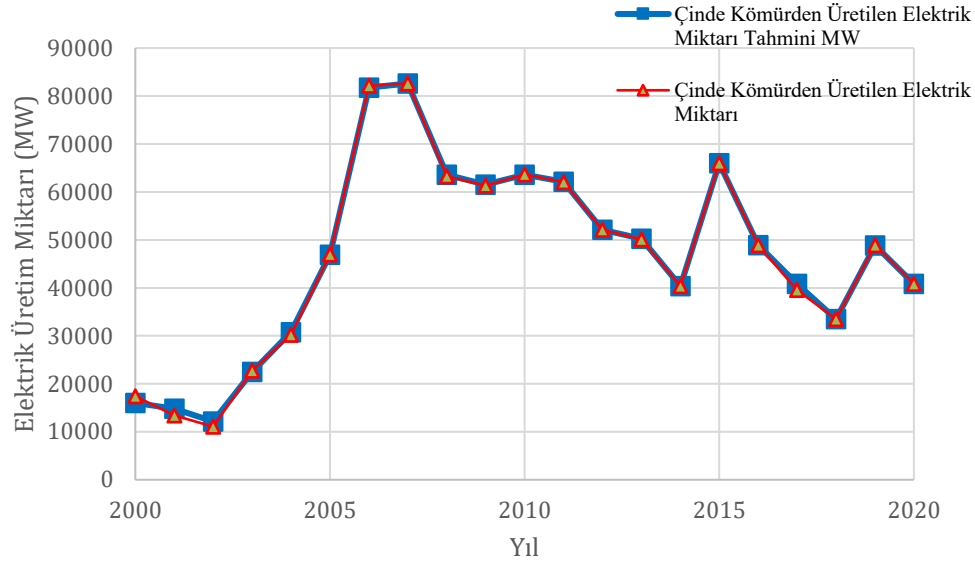
test ve validasyonun regresyon değerleri 1 çıkarken, training regresyon değeri 0.99958 ve All için regresyon değeri ise 0,99961 olarak hesaplanmıştır. Bulunan regresyon sonuçlarının 1'e yakın olması yapılan tahminin doğruluk derecesini göstermektedir.

Yapılan çalışmanın güvenilirliğinin tespiti için YSA kullanılarak elde edilen tahmin sonuçları ile gerçek değerler Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) ve Mean Absolute Percentage Error (MAPE) değerleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

Yapılan çalışmada Levenberg -Marquardt modeli ile yapılmış, input verilerinin %70'i eğitime %15'i validasyon ve %15'i test amaçlı olarak kullanılmıştır. YSA analizinde dört input verisi ve 2 hidden katmanı ve 1 output katmanı olmak üzere üç katmanlı yapı tercih edilmiştir.

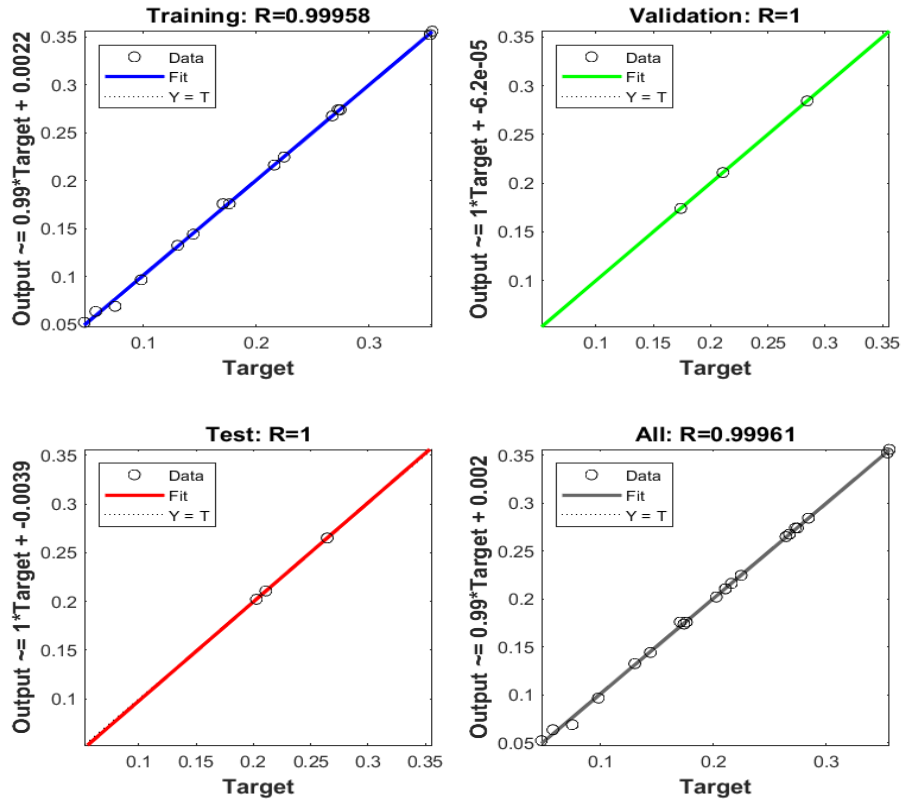
Yapılan tahminde hesaplanan regresyon değerlerinin 1'e yakınlığı yapılan çalışmanın doğruluğunu göstermektedir. Hesaplanan regresyon değerleri Çin kömürden elektrik üretim miktarları yüksek doğruluk ile tahmin edildiğini göstermektedir.

Zaaoumi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada parabolik güneş panellerinin enerji üretim miktarlarının YSA kullanılarak tahmin edilmesinde elde edilen training ve validation regresyon değerleri sırası ile 0.97033 ve 0.96923 olarak bulunmuştur. Ayrıca söz konusu çalışmada YSA dışında AM I ve AM II modelleri kullanılmıştır. YSA tahmin sonuçlarına göre hesaplanan MAE değerleri modellerden AM I



Şekil 6: Çin için kömürden elektrik üretim tahmini ile gerçek değerlerin karşılaştırılması.

HATA DEĞERLERİ	MAD	MSE	RMSE	MAE	MAPE (%)
	352,619	358772,14	598,9759	0,017	1,7



Şekil 7: Yapay sinir ağının (YSA) regresyon şekilleri.

için 3.5 iken AM II modeli için 3.09 olarak hesaplanmıştır[2].

Sarvestani ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise enerji tüketimin azaltılması ve yönetimi modern yapay zekâ yöntemleri ile çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın YSA analizi sonucunda test ve training regresyon değerleri sırası ile 0.9851 ve 0.9861 olarak hesaplanmıştır. Söz konusu çalışmanın MSE değerleri ise 6.53×10^5 ve 7.46×10^5 olarak hesaplanmıştır[16]

Yapılan çalışmada ise Training, Validation, Test ve All için regresyon değerleri sırası ile 0,99958, 1, 1, ve 0,99961 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda hesaplanan error değerleri ise MAE için 0,017, MAPE için % 1,7, MAD için 352,619, MSE için 358772,14 ve RMSE ise 598,9759 olarak hesaplanmıştır. Zaaoumi ve arkadaşları tarafından training ve validation için regresyon değerleri sırası ile 0.97033 ve 0.96923 bulunurken, söz konusu değerler bu çalışmada bulunana göre daha düşüktür. Ayrıca elde edilen tahmin değerleri kullanılarak hesaplanan MAE değerleri 0,017'den daha kötü olan 3.5 ve 3.09 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Sarvestani ve arkadaşları tarafından yapılan YSA analizinde training ve test regresyon değerleri 0.9851 ve 0.9861 olarak hesaplanırken MSE değerleri ise 6.53×10^5 ve 7.46×10^5 olarak yapılan çalışmadan daha kötü sonuçlar hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada Çin'de 2000-2020 yılları arasındaki toplam üretilen elektrik enerjisi, su gücü ile üretilen, nükleer güç ile üretilen ve rüzgâr gücü ile üretilen elektrik miktarları input olarak alınarak aynı yıllar için kömür kullanılarak üretilen elektrik miktarı YSA kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. YSA tahmininde

MATLAB programında yer alan YSA modülü input, 2 adet hidden ve output katmanlarını içerecek şekilde kullanılmıştır. Analiz sonucunda training için regresyon değeri 0,99958, validation için regresyon değeri 1, test için regresyon değeri 1 ve All için regresyon değeri 0,99961 olarak hesaplanmıştır. Yapılan tahmin değerleri ve gerçek değerler kullanılarak hata değerleri olan MAE için 0,017, MAPE için % 1,7, MAD için 352,619, MSE için 358772,14 ve RMSE için ise 598,9759 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan tahminlerdeki hata payının düşürülmesinde kullanılan input çeşitliliğinin ve veri sayısının ve sıklığının artırılmasının etkili olacağı düşünülmektedir. Ayrıca YSA için kullanılan yazılımın ve modellerin geliştirilmesinin sonuçlar üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen verilerin uzun dönem enerji yatırım planlamalarında katkıda bulunabileceği düşünülmektedir. Benzer çalışmaların yüksek enerji üretim ve tüketim miktarlarına sahip olan gelişmiş ülkeler üzerinde tekrarlanmasının önümüzdeki yıllarda enerji üretiminden kaynaklanan çevre etkiler ve iklim değişiklikleri konusundaki çalışmalara katkı sunabileceği düşünülmektedir.

Bu bulgulardan sonra yapılacak çalışmalarda;

- İleri tahmin metotları incelenmesinin daha iyi sonuçlar getireceği
- Farklı yapay zekâ modelleri geliştirilebileceği
- Derin öğrenme modellerinin de denenerek karşılaştırmada kullanılabilirliği
- Makine öğrenme modeli geliştirilebilirliği
- Farklı metotlarında karşılaştırma açısından daha iyi modeller tespit edilebileceği

- Daha az hata ile daha iyi sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI

Mehmet Hurşut GÜVEN: Kavramsal tasarım, Yazma

Faruk KILIÇ: Veri düzenleme, Analiz, Gözden geçirme

Faik Ümit DİRİ: İstatiksel analiz, veri düzenleme

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. M. Rahman vd., “Prospective Methodologies in Hybrid Renewable Energy Systems for Energy Prediction Using Artificial Neural Networks”, *Sustainability*, c. 13, sy 4, Art. sy 4, Oca. 2021, doi: 10.3390/su13042393.
- [2] A. Zaaoumi vd., “Estimation of the energy production of a parabolic trough solar thermal power plant using analytical and artificial neural networks models”, *Renew. Energy*, c. 170, ss. 620-638, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.129.
- [3] A. Entezari, A. Aslani, R. Zahedi, ve Y. Noorollahi, “Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective”, *Energy Strategy Rev.*, c. 45, s. 101017, Oca. 2023, doi: 10.1016/j.esr.2022.101017.
- [4] Y. Kasap, C. Şensöğüt, ve Ö. Ören, “Efficiency change of coal used for energy production in Turkey”, *Resour. Policy*, c. 65, s.

101577, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.resourpol.2019.101577.

[5] H. Salehfar ve S. A. Benson, “Electric utility coal quality analysis using artificial neural network techniques”, *Neurocomputing*, c. 23, sy 1, ss. 195-206, Ara. 1998, doi: 10.1016/S0925-2312(98)00083-6.

[6] A. G. Olabi vd., “Application of artificial intelligence for prediction, optimization, and control of thermal energy storage systems”, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, c. 39, s. 101730, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101730.

[7] P. Canbay ve H. Taş, “Yapıların Isıtma ve Soğutma Yükünün Yapay Zeka ile Tahmini”, *Int. J. Pure Appl. Sci.*, c. 8, sy 2, ss. 478-489, Ara. 2022, doi: 10.29132/ijpas.1166227.

[8] T. E. Boukelia, O. Arslan, ve M. S. Mecibah, “ANN-based optimization of a parabolic trough solar thermal power plant”, *Appl. Therm. Eng.*, c. 107, ss. 1210-1218, Ağu. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.084.

[9] J. Li, M. S. Herdem, J. Nathwani, ve J. Z. Wen, “Methods and applications for Artificial Intelligence, Big Data, Internet of Things, and Blockchain in smart energy management”, *Energy AI*, c. 11, s. 100208, Oca. 2023, doi: 10.1016/j.egyai.2022.100208.

[10] R. Rapier, “Global Energy Trends: Insights From The 2023 Statistical Review Of World Energy”, Forbes. Erişim: 20 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2023/08/06/global-energy-trends-insights-from-the-2023-statistical-review-of-world-energy/>

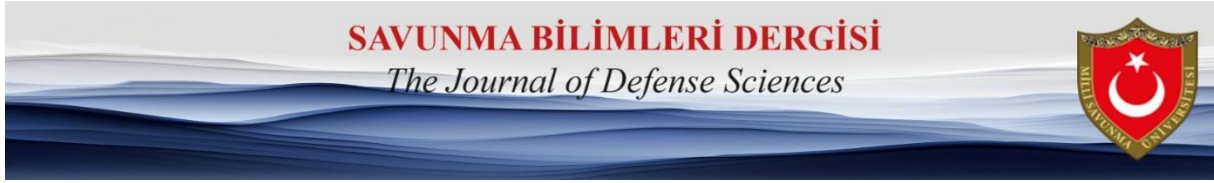
- [11] A. P. Marugán, F. P. G. Márquez, J. M. P. Perez, ve D. Ruiz-Hernández, “A survey of artificial neural network in wind energy systems”, *Appl. Energy*, c. 228, ss. 1822-1836, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.084.
- [12] D. S S, M. S. N B, ve U. Subramaniam, “Artificial Neural Network based Solar Energy Integrated Unified Power Quality Conditioner”, *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.*, c. 0, sy 0, ss. 1-25, 2021, doi: 10.1080/15567036.2021.1919247.
- [13] W. N. Wan Md Adnan, N. Yenita Dahlan, ve I. Musirin, “Artificial Neural Network Optimization in Prediction Baseline Energy Consumption to Quantify Energy Savings in Commercial Building”, içinde *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, Ağu. 2020, ss. 393-397. doi: 10.1109/ICSGRC49013.2020.9232655.
- [14] F. Yang, H. Cho, H. Zhang, J. Zhang, ve Y. Wu, “Artificial neural network (ANN) based prediction and optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for diesel engine waste heat recovery”, *Energy Convers. Manag.*, c. 164, ss. 15-26, May. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.062.
- [15] R. Kumar, R. K. Aggarwal, ve J. D. Sharma, “Energy analysis of a building using artificial neural network: A review”, *Energy Build.*, c. 65, ss. 352-358, Eki. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.007.
- [16] M. Ebrahimzadeh Sarvestani, S. Hoseiny, D. Tavana, ve F. Di Maria, “Strategic management of energy consumption and reduction of specific energy consumption using modern methods of artificial intelligence in an industrial plant”, *Energy*, c. 286, s. 129448, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.129448.
- [17] K. Ermis, A. Midilli, I. Dincer, ve M. A. Rosen, “Artificial neural network analysis of world green energy use”, *Energy Policy*, c. 35, sy 3, ss. 1731-1743, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.04.015.
- [18] H. Zhao, “Intelligent management of industrial building energy saving based on artificial intelligence”, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, c. 56, s. 103087, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103087.
- [19] C. Zeng, C. Wu, L. Zuo, B. Zhang, ve X. Hu, “Predicting energy consumption of multiproduct pipeline using artificial neural networks”, *Energy*, c. 66, ss. 791-798, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.062.
- [20] F. Kılıç, “Forecasting the Electricity Capacity and Electricity Generation Values of Wind & Solar Energy with Artificial Neural Networks Approach: The Case of Germany”, *Appl. Artif. Intell.*, c. 36, sy 1, s. 2033911, Ara. 2022, doi: 10.1080/08839514.2022.2033911.
- [21] E. Khamsehchi, M. R. Mahdiani, M. A. Amooie, ve A. Hemmati-Sarapardeh, “Modeling viscosity of light and intermediate dead oil systems using advanced computational frameworks and artificial neural networks”, *J. Pet. Sci. Eng.*, c. 193, s. 107388, Eki. 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107388.
- [22] D. J. Đozić ve B. D. Gvozdenac Urošević, “Application of artificial neural networks for testing long-term energy policy targets”, *Energy*, c. 174, ss. 488-496, May. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.191.

- [23] E. Bas, E. Egrioglu, ve T. Cansu, “Robust training of median dendritic artificial neural networks for time series forecasting”, *Expert Syst. Appl.*, c. 238, s. 122080, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122080.
- [24] E. Egrioglu, E. Bas, U. Yolcu, ve M. Y. Chen, “Picture fuzzy time series: Defining, modeling and creating a new forecasting method”, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, c. 88, s. 103367, Şub. 2020, doi: 10.1016/j.engappai.2019.103367.
- [25] Jintao He vd., “Applying artificial neural network to approximate and predict the transient dynamic behavior of CO2 combined cooling and power cycle - ScienceDirect”. Erişim: 18 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223028451>
- [26] Y. Liu, G. Yan, ve A. Settanni, “Forecasting the transportation energy demand with the help of optimization artificial neural network using an improved red fox optimizer (IRFO)”, *Heliyon*, c. 9, sy 11, s. e21599, Kas. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21599.
- [27] R. Wazirali, E. Yaghoubi, M. S. S. Abujazar, R. Ahmad, ve A. H. Vakili, “State-of-the-art review on energy and load forecasting in microgrids using artificial neural networks, machine learning, and deep learning techniques”, *Electr. Power Syst. Res.*, c. 225, s. 109792, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109792.
- [28] S. Liu, H. Chen, P. Liu, F. Qin, ve A. Fars, “A novel electricity load forecasting based on probabilistic least absolute shrinkage and selection operator-Quantile regression neural network”, *Int. J. Hydrog. Energy*, c. 48, sy 88, ss. 34486-34500, Eki. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.091.
- [29] “Leveraging artificial intelligence for simplified adiabatic compression heating prediction: Comparing the use of artificial neural networks with conventional numerical approach”, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, c. 91, s. 103546, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.ifset.2023.103546.
- [30] “Comparing Artificial Neural Network and Decision Tree Algorithm to Predict Tides at Tanjung Priok Port”, *Procedia Comput. Sci.*, c. 227, ss. 406-414, Oca. 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.10.540.
- [31] Q. Wu, C. Tan, D. Wang, Y. Wu, J. Meng, ve H. Zheng, “How carbon emission prices accelerate net zero: Evidence from China’s coal-fired power plants”, *Energy Policy*, c. 177, s. 113524, Haz. 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2023.113524.
- [32] W. Wang ve F. Li, “Study on substitutable value of electric heating instead of coal heating in northern China under carbon constraints”, *J. Clean. Prod.*, c. 260, s. 121155, Tem. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121155.
- [33] “Global Energy Monitor”, Global Energy Monitor. Erişim: 20 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://globalenergymonitor.org/>
- [34] “Enerdata”. Erişim: 20 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.enerdata.net/>
- [35] S. A. Kalogirou, C. C. Neocleous, ve C. N. Schizas, “Artificial neural networks for modelling the starting-up of a solar steam-

generator”, *Appl. Energy*, c. 60, sy 2, ss. 89-100, Haz. 1998, doi: 10.1016/S0306-2619(98)00019-1.

[36] S. Wang ve X. Dong, “Predicting China’s Energy Consumption Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms”, içinde *2009 International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering*, Tem. 2009, ss. 8-11. doi: 10.1109/BIFE.2009.11.

[37] S. A. Kalogirou, “Applications of artificial neural-networks for energy systems”, *Appl. Energy*, c. 67, sy 1, ss. 17-35, Eyl. 2000, doi: 10.1016/S0306-2619(00)00005-2.


<https://dergipark.org.tr/pub/khosbd>

Metal İşleme Sektöründe Endüstri 4.0 Olgunluk Modeli Uygulaması ve Değerlendirilmesi

Implementation and Evaluation of Industry 4.0 Maturity Model in the Metal Processing Industry

Sultan GÜL ÖZDAMAR^{1*}, Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR¹, Süleyman ERSÖZ²

¹Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Milli Güvenlik Enstitüsü, Harekât Araştırması Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05.07.2024
Düzeltilme: 20.09.2024
Kabul: 13.11.2024

Keywords

Industry 4.0
Maturity Model
Digital
Transformation
Assessment Tool.

Anahtar Kelimeler

Endüstri 4.0
Olgunluk Modeli
Dijital Dönüşüm
Değerlendirme
Aracı

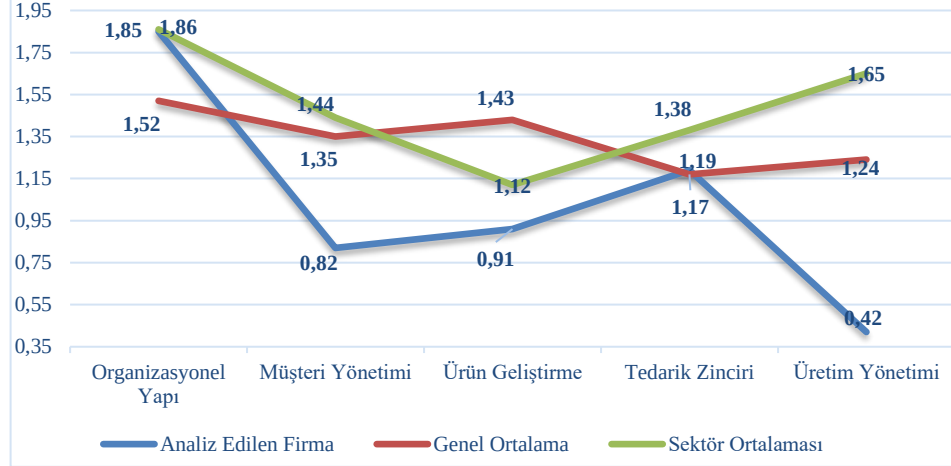
Önemli Noktalar

Dijital Olgunluk Seviyesi: Organizasyonel yapı ve tedarik zinciri yönetiminde endüstri ortalamasının üzerinde.

Geliştirilmesi Gereken Alanlar: Müşteri yönetimi, ürün geliştirme ve üretim yönetimi.

Strateji Önerileri: Dijital dönüşüm stratejilerinin belirlenmesinde öncelik verilmesi gereken alanlar.

Tablo Özet



Özet

Bu çalışma, metal işleme sektöründeki bir fabrikanın dijital olgunluk seviyesini belirleyerek Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde stratejik eksiklikleri tespit etmeyi amaçlamaktadır. Literatürdeki birçok olgunluk modeli çalışmasının aksine, bu araştırma hem firmanın dijital dönüşüm seviyesini belirleyip hem de bu seviyenin sektör ortalamalarıyla karşılaştırmasını yaparak firmanın dijitalleşme sürecindeki konumunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Boğaziçi Üniversitesi'nin Dijital Dönüşüm Değerlendirme Aracı (D3A) ile yapılan analiz, firmanın organizasyonel yapısında güçlü yönler olduğunu, ancak müşteri yönetimi ve üretim yönetimi alanlarında gelişime ihtiyacı olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda, çalışmanın bulguları işletmelere dijital dönüşüm stratejilerini oluştururken yol gösterici niteliktedir.

Abstract

This study aims to identify strategic deficiencies in the transition to Industry 4.0 by determining the digital maturity level of a factory in the metal processing sector. Unlike many maturity model studies in the literature, this research not only assesses the company's level of digital transformation but also compares it with sector averages, clearly revealing the company's position in the digitalization process. The analysis conducted using Boğaziçi University's Digital Transformation Assessment Tool (D3A) shows that the company has strengths in its organizational structure but needs improvement in customer management and production management. In this context, the study's findings serve as a guide for businesses in formulating their digital transformation strategies.

*Corresponding author, e-mail: sgozdamar@kho.msu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dördüncü Sanayi Devrimi ya da yaygın adıyla Endüstri 4.0, geleneksel üretim ve imalat süreçleri ile değer yaratma zincirlerinin dijital dönüşümünü ifade etmektedir. Bu dönüşüm, önceki üç sanayi devriminin getirdiği yeniliklerin bir uzantısıdır. Birinci Sanayi Devrimi, 18. yüzyılın sonlarında su ve buhar gücünün kullanımıyla mekanik üretimin önünü açmıştır [1,2]. 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında gerçekleşen İkinci Sanayi Devrimi ise elektrik enerjisinin kullanımına dayalı seri üretim hatları sayesinde kitlesel üretimi mümkün kılmıştır [2,3]. Üçüncü Sanayi Devrimi ise 20. yüzyılın ikinci yarısında elektronik ve bilgi teknolojilerinin kullanımıyla otomasyonun üretim süreçlerine entegre edilmesini sağlamıştır [2]. Endüstri 4.0, bir bakıma önceki üç dönemin bir birleşimi olarak, üretim teknolojilerinin dijitalleşmesini, siber-fiziksel sistemlerin entegrasyonunu ve bulut bilişim kullanımı ile maliyetlerin düşürülmesini hedefleyen önemli fırsatlar sunmaktadır [3].

Bu büyük değişim sürecinde, literatürde “Endüstri 4.0”, “Endüstriyel Nesnelerin İnterneti”, “İleri Üretim”, “Akıllı Üretim”, “Akıllı Fabrikalar” ve “Geleceğin Fabrikaları” gibi farklı isimlerle anılan, dördüncü sanayi devrimini niteleyen yenilikçi teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bu teknolojiler; mikroelektronik, robotik, internet uygulamaları, veri işleme ve depolama, bulut bilişim, bilgi ve iletişim teknolojileri, siber-fiziksel sistemler, nesnelerin ve hizmetlerin interneti, yapay zeka, otonom ekipmanlar, katmanlı üretim gibi alanlardaki gelişmeleri kapsamaktadır [4]. Örneğin, sensörler aracılığıyla toplanan veriler, bulut bilişim

platformlarında analiz edilerek üretim süreçlerinin optimize edilmesi ve kestirimci bakım yapılması sağlanır.

Dünya genelindeki üretim ortamları, Endüstri 4.0’ın sunduğu avantajlardan en iyi şekilde yararlanmak için dönüşüm geçirmektedir [5]. Yeni teknolojilerin kullanımı, emek ve sermaye odaklı üretim sistemlerinden bilgi odaklı üretim sistemlerine geçişi mümkün kılmıştır [6]. Dijital dönüşüm ve otomasyon, imalat sektörü için vazgeçilmez hale gelmiş ve Endüstri 4.0’a doğru bir evrimi tetiklemiştir [1]. Bu evrim, üretim süreçlerinde verimliliği artırma, maliyetleri düşürme ve ürün kalitesini iyileştirme hedefleriyle şirketlerin daha esnek ve müşteri odaklı üretim yapmalarına olanak tanımaktadır [7]. Şirketlerin dijital dönüşüm ve teknolojik gelişmelere uyum sağlama yetenekleri, özellikle esneklik, verimlilik ve müşteri odaklılık gibi konularda gelecekteki başarıları için kritik bir öneme sahiptir [8]. Bu yetenekler, şirketlerin değişen pazar koşullarına hızlı bir şekilde adapte olmalarını, müşteri taleplerine daha iyi yanıt vermelerini ve rekabet avantajı elde etmelerini sağlar [9]. Rekabet avantajı elde etmek isteyen şirketler, inovasyon ve hızlı adaptasyonu destekleyen sanal ve fiziksel yapıları benimsemeye yönelmektedirler [1]. İmalat şirketleri, Endüstri 4.0 çağında rekabetçi kalabilmek için dijital dönüşüme ayak uydurmak zorundadır [10]. Teknolojik ilerlemeler, imalat sektörü için yeni fırsatlar yaratmaktadır. Özellikle yapay zeka, nesnelerin interneti ve büyük veri analitiği gibi alanlardaki gelişmeler, şirketlere verimliliklerini artırma konusunda önemli imkanlar sunmaktadır [11], [12]. Ancak, dijital teknolojilere yatırım yapmadan önce,

şirketlerin mevcut durumlarını ve farklı işlevlerdeki dijital teknolojilere ve organizasyonel süreçlere dair ihtiyaçlarını net bir şekilde anlamaları gerekmektedir [10]. Ne var ki, birçok şirket, özellikle de KOSGEB'in tanımına göre 250 kişiden az çalışanı ve yıllık net satış hasılatı veya mali bilançosundan biri 250 milyon Türk Lirasını aşmayan, ve bu çalışmada aksi belirtilmedikçe bu tanıma uygun olarak kullanılacak olan Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler (KOBİ)'ler bu yeni teknolojileri benimseme konusunda kararsızlık yaşamakta, dijital dönüşümün maliyet ve etkisi konusunda belirsizliklerle karşılaşmaktadır [1], [13]. Örneğin, KOBİ'ler genellikle dijital dönüşüm için gerekli yatırımları yapma konusunda finansal kaynak sıkıntısı çekmekte, bu teknolojileri kullanabilecek yetkinlikte personel bulmakta zorlanmakta ve dijital dönüşümün getireceği faydalar konusunda yeterince bilgi sahibi olmamaktadırlar. Birçok şirket Endüstri 4.0'ın genel çerçevesini anlasa da, bu vizyonu kendi iş stratejileriyle ilişkilendirmede zorluk çekmektedir [14]. Örneğin hangi birimde dijital dönüşüm uygulamalarına öncelik verilmesi gerektiği, firma veya bölüm için hangi teknolojilerin tercih edilmesinin daha uygun olacağı gibi kararların verilmesinde olgunluk modelleri yol gösterici olmaktadır [12,15]. Dijital dönüşümün potansiyel avantajlarının farkında olan firmalar dahi, mevcut süreçlerini şirket içi teknolojiler doğrultusunda yeniden yapılandırmak için net bir yol oluşturmakta zorlanabilmekte ve bu süreçte bir rehber ihtiyacı duyabilmektedir. Bu noktada olgunluk modelleri devreye girmektedir. Endüstri 4.0 olgunluk modelleri, kapsamlı bir yol haritası sağlayarak

firmalara bu süreçte rehberlik etmek için geliştirilmiştir [16,17].

Dijital dönüşümün ilk adımı olarak, işletmelerin mevcut durumlarını ve eksikliklerini tespit etmeleri gerekmektedir. Bu nedenle, işletmelerin dijital olgunluk modelleri aracılığıyla kapsamlı bir değerlendirme yapmaları önem arz etmektedir [18]. Endüstri 4.0'ın etkin bir şekilde uygulanması için şirketlerin olgunluk seviyelerini değerlendirmeleri ve geliştirmeleri kritik bir unsurdur [19]. Olgunluk modelleri, şirketlere mevcut durumlarını analiz etme, güçlü ve zayıf yönlerini belirleme, hedeflerine uygun stratejiler geliştirme ve dijital dönüşüm süreçlerinde rehberlik etme imkanı sunmaktadır [7]. Dijital teknolojilerin üretimde etkili bir şekilde uygulanabilmesi, belirli bir olgunluk seviyesine ulaşmayı gerektirir. Dolayısıyla, şirketlerin dijital dönüşüm yolculuğuna başlamadan önce mevcut durumlarını doğru bir şekilde analiz etmeleri ve olgunluk seviyelerini nesnel bir şekilde değerlendirmeleri büyük önem taşır [20].

İmalat endüstrisi, küresel çapta "Dördüncü Sanayi Devrimi" olarak adlandırılan büyük bir değişim sürecinden geçmektedir. Endüstri 4.0 olarak da tanımlanan bu değişim, bulut bilişim ve nesnelerin interneti gibi yeni dijital teknolojilerdeki üstel büyüme ile tetiklenmektedir. İmalat sektörünün Endüstri 4.0'a doğru dönüşümü, büyük bir endüstriyel değişime zemin hazırlamaktadır [15].

Türkiye'de Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerine göre, metal imalat sektörü en çok işyerine ve çalışana sahip sektörler arasında yer almaktadır [21]. Bu çalışmada, metal işleme sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın mevcut dijital olgunluk düzeyinin belirlenmesi ve bu

düzeyi artırmak için stratejiler geliştirilmesi amaçlanmıştır. Olgunluk değerlendirmesi için Boğaziçi Üniversitesi tarafından geliştirilen ve Türkiye'de bir sanayi bölgesinde başarıyla uygulanmış ve doğrulanmış olan Dijital Dönüşüm Değerlendirme Aracı (D3A) kullanılmıştır. D3A'nın tercih edilme sebebi, modelin imalat sektörü odaklı olması ve Türkiye'deki benzer firmalarda geçerliliğinin kanıtlanmış olmasıdır [22].

Literatürdeki araştırmalarda, olgunluk modelleri genellikle firmaların sadece mevcut durumlarını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada, metal işleme sektöründen bir firmanın olgunluk puanı, Yıldız'ın "Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler İçin Dijital Olgunluk Modelinin Geliştirilmesi: Türkiye'de Bir Vaka Çalışması" adlı çalışmasında sanayi bölgesindeki firmalar için belirlenen genel olgunluk ortalamaları ve metal sektöründeki firmaların ortalama olgunluk puanları ile karşılaştırılmıştır [22]. Bu yaklaşım, firmanın dijital dönüşümdeki konumunu daha net bir şekilde ortaya koyarak sektör içindeki performansının değerlendirmesini sağlamaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde dijital olgunluk modelleri üzerine yapılan uygulamalar değerlendirilmekte, üçüncü bölümde ise araştırma metodolojisi açıklanmaktadır. Dördüncü ve beşinci bölümlerde bulgular ve analiz süreci detaylandırılarak, firmanın sektördeki diğer işletmelerle karşılaştırmalı durumu tartışılmaktadır. Son olarak, firmanın dijital dönüşüm stratejilerini geliştirmeye yönelik öneriler sunulmaktadır.

2. DİJİTAL OLGUNLUK MODELLERİ UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF DIGITAL MATURITY MODELS)

Son yıllarda endüstriyel sektörlerdeki hızlı değişim ve gelişmeler, imalat şirketlerinin karşılaştığı zorlukları anlamalarını ve bu zorluklara etkili çözümler bulmalarını gerektirmiştir. Bu bağlamda, birçok araştırmacı ve uzman, imalat şirketlerinin Endüstri 4.0'a geçiş süreçlerini anlamak, değerlendirmek ve yönetmek için farklı olgunluk modelleri ve değerlendirme araçları geliştirmiştir. Zamanında ve doğru yapılan teknoloji hazırlığı değerlendirmelerinin amacı, yönetimin en son teknolojinin kullanımıyla ilgili kararlar almasına destek olmaktır [9]. Bu bölümde, dijital olgunluk modellerinin uygulamalarını ele alan çalışmalardan örnekler sunulmuştur. Tablo 1'de özetlenen çalışmalar, yayın tarihine göre kronolojik olarak sıralanmış ve literatürdeki çeşitlilik ile kapsamı yansıtacak şekilde derlenmiştir.

Lichtblau ve arkadaşları, IMPULS Vakfı tarafından desteklenen Alman Makine Mühendisleri Endüstri Birliği uzmanları ve çeşitli sektör temsilcileri IMPULS Endüstri 4.0 olgunluk modelini oluşturmuşlardır. Bu model ile özellikle imalat firmalarının Endüstri 4.0'a ne ölçüde hazır olduklarını ve mevcut durumlarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Model; "Strateji ve Organizasyon", "Akıllı Fabrika", "Akıllı İşlemler", "Akıllı Ürünler", "Veri Odaklı Hizmetler" ve "Çalışanlar" olmak üzere 6 temel boyuttan oluşmaktadır. Her boyut ile işletmelerin Endüstri 4.0'a geçiş sürecindeki ilerlemesini; yabancı, yeni başlayan, orta seviye, deneyimli, uzman ve en iyi performans olmak üzere 5 farklı seviyede değerlendirmişlerdir [23].

Schumacher ve arkadaşları, imalat işletmelerinin Endüstri 4.0'a hazır olma durumunu ve olgunluk seviyelerini değerlendirmek için bir olgunluk modeli önermişlerdir. Modeli, teknoloji odağını genişleterek organizasyonel unsurları da içerecek şekilde tasarlamışlardır. Bu doğrultuda, yazarlar "Ürünler", "Müşteriler", "Operasyonlar" ve "Teknoloji" boyutlarının yanı sıra; "Strateji", "Liderlik", "Yönetişim", "Kültür" ve "İnsanlar" olmak üzere organizasyonel boyutları da modele dahil etmişlerdir. Toplamda 9 boyut ve 62 maddeden oluşan modeli, bir anket aracılığıyla uygulamakta ve her bir maddeyi 1 ile 5 arasında değişen bir Likert ölçeği ile değerlendirmektedirler. Yazarlar, modeli Avusturya'da faaliyet gösteren ve yaklaşık 400 çalışanı bulunan bir havacılık ekipmanları üreticisine uygulamışlardır. Uygulama sonucunda, firmanın genel olgunluk seviyesini 2,6 olarak belirlemiş ve özellikle strateji boyutunda iyileştirme ihtiyacı olduğu tespit etmişlerdir [1].

De Carolis ve arkadaşları, 6 anahtar boyuttan (strateji, liderlik, pazar, operasyonlar, insanlar ve teknoloji) oluşan bir dijital olgunluk modeli geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, İtalya'daki üretim şirketlerinde gerçekleştirdikleri vaka çalışmalarıyla, modelin dijital dönüşüm süreçlerini anlamada ve yönetmede etkili olduğunu göstermişlerdir. Çalışmanın sonuçlarıyla, dijital olgunluğun, üretim süreçlerinin verimliliği, ürün kalitesi ve müşteri memnuniyeti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, dijital olgunluğun, üretim şirketlerinin rekabet gücünü artırmada önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır [20].

Şener ve arkadaşları, Türkiye'deki işletmeler için 5 boyuttan (strateji, teknoloji, organizasyon, süreçler ve insanlar) oluşan bir olgunluk modeli önermişlerdir. Model, işletmelerin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadığını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırmacılar, modeli Türkiye'deki çeşitli sektörlerden işletmelere uygulamışlar ve sonuç olarak, işletmelerin çoğunun Endüstri 4.0'a geçiş sürecinin başında olduğunu tespit etmişlerdir [16].

Almanya'da imalat sektöründe faaliyet gösteren firmaların Akıllı Hizmetler olgunluk seviyesini inceleyen Kaltenbach ve arkadaşları, bu alanda olgunluk seviyesini ölçmek için "Akıllı Hizmetler Sunma", "Gelecek Planları", "Akıllı Hizmet Sayısı", "Otomasyon Seviyesi" ve "Eş Zamanlı Mühendislik" olmak üzere 5 alt kategori belirlemişlerdir. 3 Alman imalat firması üzerinde yaptıkları uygulama sonucunda, firmaların Akıllı Hizmetler alanındaki olgunluk seviyelerinin teknoloji yönetimi, finansal kaynaklar ve şirket kültürü gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini ve özellikle eş zamanlı mühendislik ve otomasyon seviyesinin geliştirilmesi gereken alanlar olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışma, Akıllı Hizmetler gibi spesifik bir alanda olgunluk modellerinin nasıl uygulanabileceğine dair bir örnek sunmaktadır [24].

Hamidi ve arkadaşları, Malezya'daki KOBİ'lerin Endüstri 4.0'a hazır bulunuşluk durumunu değerlendirmek için IMPULS olgunluk modelini kullanmışlardır. Yazarlar, anket yöntemiyle veri toplayarak, Malezya'daki KOBİ'lerin mevcut durumunu analiz etmişlerdir. Araştırma sonuçları, Malezya'daki KOBİ'lerin özellikle çalışanların becerileri ve eğitimleri, veri odaklı hizmetler ve akıllı ürünler gibi boyutlarda

geliştirilmesi gereken alanlar olduğunu ortaya koymuştur. [19].

Colli ve arkadaşları, olgunluk modellerinin Endüstri 4.0 bağlamında nasıl uygulanabileceğine dair 4 aşamalı (farkındalık, kavrama, uygulama ve olgunluk) bir süreç önermişlerdir. Bu sürecin, işletmelerin Endüstri 4.0'a geçişlerini planlamalarına ve yönetmelerine yardımcı olmayı amaçladığını vurgulamaktadırlar. Araştırmacılar, İtalya'daki imalat şirketlerinde yaptıkları çalışmada, olgunluk modellerinin, işletmelerin dijital dönüşüm yolculuklarında bir yol haritası işlevi gördüğünü ve dijitalleşme stratejilerini geliştirmelerine katkı sağladığını belirtmişlerdir [15].

Bibby ve Dehe, savunma sanayi sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın Endüstri 4.0 olgunluk seviyesini değerlendirmek için "Geleceğin Fabrikası", "İnsan ve Kültür" ve "Strateji" olmak üzere 3 ana boyuttan oluşan bir model geliştirmişlerdir. "Geleceğin Fabrikası" boyutu; Katmanlı Üretim, Bulut Bilişim, Üretim Yürütme Sistemi, Nesnelerin İnterneti ve Siber-Fiziksel Sistemler, Büyük Veri, Sensörler, e-Değer Zincirleri ve Otonom Robotlar olmak üzere 8 alt boyuttan oluşmaktadır. Yazarlar, modeli İngiltere'de savunma sektöründe faaliyet gösteren bir ana firma ve tedarik zincirindeki 12 firma üzerinde uygulamışlardır. Uygulama sonucunda, ana firmanın olgunluk seviyesinin sektör ortalamasının üzerinde olduğunu belirlemişlerdir [25].

Schumacher ve arkadaşları, imalat işletmelerinin Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini değerlendirmek ve dijitalleşme yol haritaları oluşturmak için 10 adımlı bütüncül bir prosedür

modeli sunmuşlardır. Bu modelin temelini, 8 ana boyut ve 65 alt boyuttan oluşan bir olgunluk değerlendirmesi oluşturmaktadır. Bu boyutlar; "Teknoloji", "Ürünler", "Müşteriler ve Ortaklar", "Değer Yaratma Süreçleri", "Veri ve Enformasyon", "Kurumsal Standartlar", "Çalışanlar ve Strateji" ve "Liderlik" olarak sıralanmaktadır. Model, her bir alt boyut için ayrı ayrı tanımlanmış 4 olgunluk seviyesi içermektedir. Yazarlar, modeli 2 yıllık bir süre zarfında, farklı ülkelerdeki üretim tesislerinde test ederek doğrulamış ve iyileştirmişlerdir. Ayrıca, küresel bir Endüstri 4.0 stratejisi oluşturmayı hedefleyen bir imalat şirketinde modelin uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Uygulama sonucunda, firmanın mevcut olgunluk seviyelerini belirlemiş, her bir alt boyut için hedef olgunluk seviyeleri tanımlamış ve iyileştirme alanlarını tespit etmişlerdir. Bu iyileştirme alanlarını, önceliklendirerek şirkete özel bir dijital dönüşüm yol haritası oluşturmuşlardır [26].

Temur ve arkadaşları, IMPULS modelini kullanarak Türkiye'de inşaat, tekstil ve tel üretimi sektörlerinde faaliyet gösteren 3 öncü firmanın Endüstri 4.0'a hazır bulunuşluk seviyelerini analiz etmişlerdir. Ayrıca firmaların dijital dönüşümün operasyonel ve sosyo-ekonomik etkilerine ilişkin farkındalıklarını da incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarının, inceledikleri firmaların Endüstri 4.0'a adaptasyon sürecinde yol haritası hazırlamada ve yeni iş gücü planlama stratejileri geliştirme konusunda eksiklikleri olduğunu ve belirsiz bir ortamda öncü olmaktan ziyade takipçi olmayı tercih ettiklerini gösterdiğini belirtmişlerdir [27].

Gajsek ve arkadaşları ise KOBİ'ler için 7

boyuttan (strateji, liderlik, pazar, ürünler, operasyonlar, kültür ve insanlar) oluşan bir dijital olgunluk değerlendirme modeli geliştirmişlerdir. Model, KOBİ'lerin dijital dönüşüm süreçlerindeki güçlü ve zayıf yönlerini belirlemelerine yardımcı olmayı hedeflemektedir. Araştırmacılar, modeli Slovenya'daki KOBİ'lere uygulamışlar ve KOBİ'lerin dijital olgunluk seviyelerinin, sektöre ve işletme büyüklüğüne göre değiştiğini gözlemlemişlerdir [5].

Lin ve arkadaşları, Tayvanlı işletmelerin akıllı üretime hazır olma durumlarını değerlendirmek için Singapur Ekonomik Kalkınma Kurulu tarafından geliştirilen Akıllı Endüstri Hazırlık Endeksi'ni (SIRI) temel alan bir olgunluk modeli kullanmışlardır. Model, “Süreç”, “Teknoloji” ve “Organizasyon” olmak üzere 3 ana yapı taşı ve 8 temel sütun altında 16 boyuttan oluşmaktadır. Yazarlar, modeli Tayvan'da faaliyet gösteren 80 işletmeye uygulamışlardır. Anket sonuçlarına göre, işletmelerin olgunluk seviyeleri, olgunlaşmamış (seviye 0-1), kısmen olgunlaşmış (seviye 2-3) ve olgun (seviye 4-5) olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmıştır. Araştırma sonuçları, incelenen işletmelerin çoğunun (%83) olgunlaşmamış veya kısmen olgunlaşmış olduğunu ve Endüstri 4.0'a yönelik dönüşüm stratejilerini iyileştirmeleri gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, boyutlar arasında pozitif bir korelasyon olduğunu belirlemişlerdir [28].

Bandara ve arkadaşları, Sri Lanka bankacılık sektörünün Endüstri 4.0 olgunluk seviyesini değerlendirmek amacıyla, literatürdeki çalışmalardan uyarladıkları bir modeli kullanmışlardır. Model; “Ürünler ve Hizmetler”, “Teknoloji ve Kaynaklar”, “Strateji ve

Organizasyon”, “Operasyonlar”, “Müşteriler”, “Yönetişim” ve “Çalışanlar” olmak üzere 7 boyuttan oluşmaktadır. Yazarlar, modeli Sri Lanka'daki 10 bankanın üst düzey yöneticileriyle görüşmeler yaparak ve anket uygulayarak test etmişlerdir. Yazarlar, olgunluk seviyelerini 5 aşamalı bir ölçekte değerlendirmişlerdir. Araştırma sonucunda, Sri Lanka bankacılık sektörünün genel olgunluk seviyesinin “Tanımlanmış” seviyede (3,668) olduğunu belirlemişlerdir [29].

Türkiye'de lojistik sektöründe faaliyet gösteren firmaların Endüstri 4.0 olgunluk düzeylerini belirlemek amacıyla, Baki ve Serdar yaptıkları çalışmada, IMPULS olgunluk modelini temel alarak iki farklı yaklaşım önermişlerdir. Yazarlar, Ağırlıklandırılmış Olgunluk Puan Hesaplama Modeli Yaklaşımı ve Çok Kriterli Olgunluk Modeli Yaklaşımı (AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR) yöntemlerini kullanarak, 10 lojistik firmasının olgunluk düzeylerini değerlendirmiş ve firmaları sıralamışlardır. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle belirledikleri kriter ağırlıklarına göre, “Strateji ve Organizasyon” kriteri en yüksek ağırlığa sahip olurken, “Veri Odaklı Hizmetler” kriterinin en düşük ağırlığa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmada ayrıca, kriter ağırlıklarının değiştirilmesinin sıralamaya etkisini, duyarlılık analizi ile incelemişlerdir [7].

Moura ve Kohl, Brezilya ve Almanya'daki şirketlerin Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, Alman Makine ve Ekipman İmalatçıları Birliği tarafından geliştirilen ve altı boyuttan (strateji ve organizasyon, akıllı fabrika, akıllı operasyonlar, akıllı ürünler, veri odaklı

hizmetler ve çalışanlar) oluşan "Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli"ni kullanmışlardır. Araştırmacılar, modeli Almanya'da 289 ve Brezilya'da 46 şirkete uygulamışlardır. Her iki ülkedeki şirketlerin genel ortalama olgunluk seviyesini 0-5 ölçeğinde 0,9 olarak bulmuşlar ve "Başlangıç" seviyesinde sınıflandırmışlardır. Bununla birlikte, Alman firmalarının %5,6'sının "İleri" seviyede olduğu, Brezilya'da ise bu seviyede hiçbir firmanın bulunmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, Alman firmalarının özellikle "Akıllı Ürünler" boyutunda, Brezilyalı firmalara göre daha yüksek olgunluk seviyesine sahip olduğunu belirlemişlerdir [14].

Wagire ve arkadaşları, Hindistan'daki imalat sanayi işletmeleri için Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini değerlendirmeye yönelik bir model önermişlerdir. Bu model, "İnsan ve Kültür", "Endüstri 4.0 Farkındalığı", "Organizasyonel Strateji", "Değer Zinciri ve Süreçler", "Akıllı Üretim Teknolojisi", "Ürün ve Hizmet Odaklı Teknoloji" ve "Endüstri 4.0 Temel Teknolojisi" olmak üzere 7 boyuttan ve 38 olgunluk ögesinden oluşmaktadır. Yazarlar, modelin geliştirilmesinde uzman görüşlerinden ve AHP yönteminden yararlanmışlardır. Modeli bir otomotiv yan sanayi firmasında uygulamışlar ve firmanın "Dijital Acemi" olgunluk seviyesinde (en yüksek 5 üzerinden 2,88 puan) olduğunu tespit etmişlerdir [30].

Rafael ve arkadaşları, takım tezgahı şirketleri için "Takım Tezgahı Şirketleri için Endüstri 4.0 Olgunluk Modeli" adını verdikleri bir olgunluk modeli geliştirmişlerdir. Model; "Strateji ve Organizasyon", "Akıllı Fabrika", "Akıllı Operasyonlar", "Akıllı Ürünler", "Veri Odaklı Hizmetler" ve "Çalışanlar" olmak üzere 6 ana

boyuttan oluşmaktadır. Yazarlar, daha önce doğrulanmış modellere ve olgunluk modelleriyle ilgili standartlara dayalı olarak tasarladıkları bu modeli, sektörde faaliyet gösteren bir takım tezgahı üreticisinde uygulamışlardır. Uygulama sonucunda, şirketin özellikle dijital dönüşüm vizyonunun net olarak tanımlanması, yol haritasının oluşturulması, gerekli kaynakların ayrılması ve çalışanların dijital yetkinliklerinin geliştirilmesi gibi alanlarda iyileştirmeler yapması gerektiğini belirlemişlerdir [11].

Yıldız, çalışmasında imalat sektöründeki KOBİ'lerde kullanılması amacıyla D3A'yı geliştirmiştir. Bu model ile farklı sektörlerde üretim yapan 100 KOBİ'nin dijital dönüşüm seviyesini ölçmüş, modelin geçerlilik ve doğruluğunu kanıtlamıştır. D3A skoru = 1,49 olan metal endüstrisinin; organizasyonel yapı ve üretim boyutlarında yüksek puanlar aldığı ve tüm endüstriler arasında en yüksek organizasyonel yapı puanlarına sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır. Metal sektöründeki firmaların; üretim boyutunun en düşük dijital değerlendirme boyutu olmasına rağmen, müşteri, ürün yönetimi ve tedarik zinciri boyutlarında orta düzeyde puanlar elde ettiğini raporlamıştır [22].

Ünal ve arkadaşları, Türkiye'de imalat sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini değerlendirmek amacıyla Sanayi 4.0 Olgunluk (SANOL) Modeli adını verdikleri bir model geliştirmişlerdir. "Strateji ve Yönetim", "Müşteriler ve Tedarikçiler", "Çalışanlar ve Kurum Kültürü", "Teknoloji", "Veri ve Güvenlik" ile "Destekler ve Teşvikler" olmak üzere 6 boyuttan oluşan bu model, literatürdeki diğer modellerden farklı olarak "Destekler ve Teşvikler" boyutunu da

içermektedir. Yazarlar, bu boyutun eklenmesiyle, düzenleyici ve denetleyici otoriteler tarafından sağlanacak teşviklerin, işletmelerin Endüstri 4.0'a geçişini hızlandıracağını ve kolaylaştıracağını vurgulamışlardır. Modeli, Ankara Sanayi Odası Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren çeşitli sektörlerden 87 işletmeye uygulamış ve işletmelerin olgunluk seviyelerini; kuruluş yılı, faaliyet gösterdikleri sektör, işletme büyüklüğü, sermaye yapısı ve yıllık ciro gibi değişkenlere göre analiz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, katılımcı işletmelerin çoğunun Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerinin düşük olduğunu ve dijital dönüşüm süreçlerinde henüz yolun başında olduklarını tespit etmişlerdir [12].

Demir ve arkadaşları, Şanlıurfa ilinde faaliyet gösteren KOBİ'lerin Endüstri 4.0 farkındalıklarını ve olgunluk seviyelerini araştırmışlardır. 120 KOBİ üzerinde yapılan anket çalışması, KOBİ'lerin Endüstri 4.0 farkındalık seviyelerinin orta düzeyde olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Akıllı ve Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Hazırlık ve Olgunluk (ASTZHO) modelini kullanarak, dört farklı sektörden (makine, enerji, tekstil ve gıda) 12 firmanın Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerini değerlendirmişlerdir. Analizler, olgunluk seviyelerinin sektöre, sürdürülebilirlik boyutlarına ve Endüstri 4.0 araçlarına göre farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, tekstil ve gıda sektörlerindeki KOBİ'lerin teknolojik altyapılarını geliştirerek Endüstri 4.0 farkındalıklarını artırmaları gerektiğini vurgulamışlardır [31].

Chen ve arkadaşları, Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (DEMATEL)

yöntemini kullanarak dijital dönüşüm kriterleri arasındaki ilişkiyi görselleştirmiş, Analitik Ağ Süreci (ANP) yöntemiyle göstergelerin ağırlıklarını belirlemiş ve sonrasında bulanık kapsamlı değerlendirme yöntemini kullanarak KOBİ'lerin dijital olgunluklarını değerlendirmişlerdir. Model, “Strateji”, “Organizasyon ve İnsanlar”, “Bilgi Teknolojileri”, “Süreç ve Yönetim”, “Entegrasyon” ve “İnovasyon” olmak üzere 6 boyutu kapsamaktadır. Yazarlar, modeli KOBİ'lere uygulayarak, dijital strateji ve bilgi teknolojilerinin işletmelerin dijital dönüşümünde kilit rol oynadığını, dijital süreç ve dijital inovasyonun ise KOBİ'lerin karşılaştığı temel sorunlar olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, işletmelerin dijital olgunluklarının endüstriyel altyapı, bölgesel politikalar ve sektör türleri gibi faktörlerle ilişkili olduğunu belirlemişlerdir [32].

Merdin ve arkadaşları Türkiye'deki işletmelerin dijital olgunluk seviyelerini ölçmek için "Dijital Olgunluk Modeli"ni önermişlerdir. Model; “Strateji”, “Müşteri”, “Çalışan”, “Süreç Yönetimi”, “Teknoloji ve Veri Yönetimi”, “Organizasyonel Kültür” ve “İnovasyon” olmak üzere 7 boyuttan oluşmaktadır. Yazarlar, modelin uygulanabilirliğini göstermek için Türkiye'deki işletmeler üzerinde bir ölçek çalışması gerçekleştirmişlerdir. Ölçekleri, 499 maddeden oluşmakta ve hem dijital dönüşümle ilgili algı düzeyini ölçen soruları hem de işletmelerin mevcut dijital uygulamalarını sorgulayan maddeleri içermektedir. Çalışmalarında, çevresel faktörlerin (teşvikler, yasal düzenlemeler vb.) dijital olgunluk modellerinde yeterince dikkate alınmadığını ortaya koymuş ve bu boyutu kendi modellerine dahil etmişlerdir [18]

Senna ve arkadaşları, 55 farklı dijital olgunluk modelini sistematik bir literatür taramasıyla incelemiş ve bu modelleri TOE (Teknoloji-Organizasyon-Çevre) çerçevesinin altında sınıflandırmışlardır. Geliştirdikleri model, 3 ana boyut, 12 eksen ve 50 maddeden oluşmaktadır. Modelin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla, çeşitli imalat sektörlerinde faaliyet gösteren 24 Portekiz firması üzerinde odak grup çalışması ve iki aşamalı vaka araştırması gerçekleştirmişlerdir. Araştırma sonuçları ile mevcut dijital olgunluk modellerinin çevre boyutunu yeterince dikkate almadığını ve firmaların organizasyonel ve çevresel kısıtlamaları göz önünde bulundurmadan dijital teknolojilere yatırım yapma eğiliminde olduklarını ortaya koymuşlardır [33].

Akyüz ve Balkan, Türkiye'de cam balkon üretimi yapan bir işletmede akıllı üretim olgunluk seviyesini değerlendirmek için çok boyutlu bir olgunluk değerlendirme aracı kullanmışlardır. Yazarlar, “Bilgi Kullanılabilirliği Olgunluğu”, “Teknolojik Olgunluk”, “Organizasyonel Olgunluk”, “Yönetimsel Olgunluk” ve “İnsan Kaynakları” olgunluğu olmak üzere 5 ana boyuttan oluşan bir model önermişlerdir. Model, her bir boyut için belirli kriterleri ve bu kriterlere ilişkin olgunluk seviyelerini içermektedir. Akyüz ve Balkan modeli, Türkiye'de cam balkon üretimi yapan bir firmaya uygulayarak, firmanın mevcut olgunluk seviyesini belirlemiş ve her bir boyut için iyileştirme önerileri sunmuşlardır.

Çalışmada, ağırlıklandırılmış olgunluk indeksi hesaplama yöntemi kullanarak, firmanın genel olgunluk seviyesini de sayısal olarak ortaya koymuşlardır [34].

Sukrat ve Leeraphong, Tayland'daki mikro işletmelerin (Türkiye'deki KOSGEB tanımına göre, 10 kişiden az çalışanı ve yıllık net satış hasılatı veya mali bilançosundan biri 5 milyon Türk Lirasını aşmayan işletmelere karşılık gelmektedir [13].) dijital dönüşüm süreçlerini incelemiş ve “İş Stratejisi”, “Süreç”, “Teknoloji” ve “İnsan” olmak üzere 4 boyuttan oluşan bir olgunluk modeli geliştirmişlerdir. Yazarlar, başlangıç, orta, deneyimli ve lider şeklinde 4 olgunluk seviyesi tanımlamışlardır. 12 mikro işletme üzerinde yaptıkları çalışmada, gelişmekte olan ülkelerdeki mikro işletmelerin dijital dönüşümünün, yetersiz kaynaklar, yüksek teknoloji maliyetleri ve yetersiz devlet desteği gibi engeller nedeniyle gelişmiş ülkelerdeki işletmelere kıyasla daha yavaş ilerlediğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, dijital dönüşüm stratejilerindeki değişimin; nitelikli personel eksikliği, yetersiz bilgi teknolojileri altyapısı, değişime karşı direnç ve stratejik uyum eksikliği gibi faktörlerden kaynaklandığını bulmuşlardır. Model, gelişmekte olan ülkelerdeki mikro işletmelerin dijital dönüşüm yolculuğunda mevcut durumlarını değerlendirmelerine ve iyileştirme alanlarını belirlemelerine yardımcı olacak bir araç olarak önerilmektedir [35].

Tablo 1: Olgunluk modeli uygulaması içeren örnek çalışmalar.

Referans	Sektör	Olgunluk Modeli	Boyutlar	Uygulama ve Öne Çıkan Bulgular
(Lichtblau vd., 2015) [23]	İmalat	IMPULS	Strateji ve Organizasyon Akıllı Fabrika Akıllı Operasyonlar Akıllı Ürünler Veri Odaklı Hizmetler Çalışanlar	Alman firmalarına yönelik bir öz-değerlendirme aracı geliştirilmiştir. Alman makine ve ekipman imalatı sektöründeki firmaların genel olgunluk seviyesinin düşük olduğu tespit edilmiştir.
Schumacher vd. (2016)	İmalat	9 Boyutlu Model	Strateji Liderlik Müşteriler Ürünler Operasyonlar Kültür İnsanlar Yönetişim Teknoloji	Model, Avusturya'da havacılık ekipmanları üreten bir imalat firmasına pilot çalışma olarak uygulanmıştır. Strateji boyutunda zayıflıklar olduğu belirlenmiştir.
De Carolis vd. (2017)	İmalat	6 Boyutlu Model	Strateji Liderlik Pazar Operasyonlar İnsanlar Teknoloji	İtalya'daki üretim şirketlerinde yapılan çalışmada, dijital olgunluğun; üretim süreçlerinin verimliliği, ürün kalitesi ve müşteri memnuniyeti üzerinde olumlu bir etkisi olduğu saptanmıştır.
(Şener vd, 2018) [16]	Belirtilmemiş	5 Boyutlu Model	Strateji Teknoloji Organizasyon Süreçler İnsanlar	Türkiye'de farklı sektörlerden firmalar incelenmiş ve çoğunun Endüstri 4.0 geçiş sürecinin başında olduğu gözlemlenmiştir.
(Kaltenbach vd., 2018)	İmalat	Akıllı Hizmetler Olgunluk Modeli	Akıllı Hizmetler Sunma Gelecek Planları Akıllı Hizmet Sayısı Otomasyon Seviyesi Eş Zamanlı Mühendislik	Üç Alman imalat firması üzerinde yapılan analizde; teknoloji yönetimi, finansal kaynaklar ve şirket kültürünün dijital olgunluk seviyesinde belirleyici faktörler olduğu sonucuna varılmıştır.
Hamidi vd. (2018)	KOBİ'ler	IMPULS	Strateji ve Organizasyon Akıllı Fabrika Akıllı Operasyonlar Akıllı Ürünler Veri Odaklı Hizmetler Çalışanlar	Malezya'daki KOBİ'ler için yapılan çalışmada; çalışan becerileri, veri odaklı hizmetler ve akıllı ürünler boyutlarında gelişim ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir.
Colli vd. (2018)	İmalat	4 Aşamalı Süreç Modeli	Farkındalık Kavrama Uygulama Olgunluk	İtalya'daki imalat şirketleri üzerinde yapılan analizler, olgunluk modellerinin dijital dönüşüm sürecinde bir yol haritası olarak kullanılabileceğini göstermiştir.
Bibby ve Dehe (2018)	Savunma Sanayi	3 Boyutlu Model	Geleceğin Fabrikası İnsan ve Kültür Strateji	İngiltere'de bir ana firma ve 12 tedarikçi firma incelenmiştir. Ana firmanın sektör ortalamasının üzerinde bir olgunluk seviyesine sahip olduğu, ancak tedarikçilerin olgunluk seviyelerinin farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 1: (Devamı)

Referans	Sektör	Olgunluk Modeli	Boyutlar	Uygulama ve Öne Çıkan Bulgular
Schumacher vd. (2019)	İmalat	10 Adımlı Bütüncül Prosedür Modeli	Teknoloji Ürünler Müşteriler ve Ortaklar Değer Yaratma Süreçleri Veri ve Enformasyon Kurumsal Standartlar Çalışanlar Strateji ve Liderlik	Model, farklı ülkelerdeki üretim tesislerinde test edilmiştir. Bir imalat firmasının olgunluk seviyeleri belirlenerek, iyileştirme alanları tanımlanmıştır.
(Temur vd., 2019) [27]	İnşaat Tekstil Tel Üretimi	IMPULS	Strateji ve Organizasyon Akıllı Fabrika Akıllı Operasyonlar Akıllı Ürünler Veri Odaklı Hizmetler Çalışanlar	Türkiye'de inşaat, tekstil ve tel üretimi sektörlerinde faaliyet gösteren üç firma incelenmiştir. Firmalarda iş gücü planlaması konusunda eksiklikler olduğu ve takipçi bir strateji benimsedikleri gözlemlenmiştir.
Gajsek vd. (2019)	KOBİ'ler	7 Boyutlu Model	Strateji Liderlik Pazar Ürünler Operasyonlar Kültür İnsanlar	Slovenya'daki KOBİ'lerin dijital olgunluk seviyelerinin sektöre ve işletme büyüklüğüne göre değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.
Lin vd. (2019)	KOBİ'ler	Akıllı Endüstri Hazırlık Endeksi (SIRI)	Süreç Teknoloji Organizasyon	Tayvan'daki işletmelerin %83'ünün olgunlaşmamış veya kısmen olgunlaşmış olduğu bulunmuştur. Süreç, teknoloji ve organizasyon boyutları arasında pozitif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir.
Bandara vd. (2019)	Bankacılık	7 Boyutlu Model	Ürünler ve Hizmetler Teknoloji ve Kaynaklar Strateji ve Organizasyon Operasyonlar Müşteriler Yönetişim Çalışanlar	Sri Lanka'daki 10 bankanın üst düzey yöneticileriyle görüşmeler ve anketler yapılmıştır. Bankacılık sektörünün genel olgunluk seviyesinin "Tanımlanmış" kategorisinde olduğu belirlenmiştir.
(Baki ve Serdar, 2020) [7]	Lojistik	IMPULS	Strateji ve Organizasyon Akıllı Fabrika Akıllı Operasyonlar Akıllı Ürünler Veri Odaklı Hizmetler Çalışanlar	AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR yöntemleri kullanılarak 10 lojistik firması sıralanmıştır. Strateji ve organizasyon boyutunun en yüksek ağırlığa sahip olduğu, veri odaklı hizmetler boyutunun ise en düşük ağırlığa sahip olduğu belirlenmiştir.
Moura ve Kohl (2020)	Belirtilmemiş	Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli	Strateji ve Organizasyon Akıllı Fabrika Akıllı Operasyonlar Akıllı Ürünler Veri Odaklı Hizmetler Çalışanlar	Almanya'da 289, Brezilya'da 46 firma incelenmiştir. Ortalama olgunluk seviyesi 0,9 (0-5) olarak hesaplanmıştır. Alman firmalarının %5,6'sının "İleri" seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1: (Devamı)

Referans	Sektör	Olgunluk Modeli	Boyutlar	Uygulama ve Öne Çıkan Bulgular
Wagire vd. (2020)	İmalat	7 Boyutlu Model	İnsan ve Kültür Endüstri 4.0 Farkındalığı Organizasyonel Strateji Değer Zinciri ve Süreçler Akıllı Üretim Teknolojisi Ürün ve Hizmet Odaklı Teknoloji Endüstri 4.0 Temel Teknolojisi	Hindistan'da bir otomotiv yan sanayi firmasına Bulanık AHP yöntemi uygulanmıştır. Firmanın "Dijital Acemi" (2.88/5) olarak sınıflandırıldığı belirlenmiştir.
Rafael vd. (2020)	Takım Tezgahı	Takım Tezgahı Şirketleri için Endüstri 4.0 Olgunluk Modeli	Strateji ve Organizasyon Akıllı Fabrika Akıllı Operasyonlar Akıllı Ürünler Veri Odaklı Hizmetler Çalışanlar	Bir takım tezgahı üreticisi üzerinde yapılan çalışmada; dijital dönüşüm vizyonunun net bir şekilde tanımlanması, bir yol haritası oluşturulması ve çalışanların dijital yetkinliklerinin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
(Yıldız, 2021) [22]	İmalat	D3A	Üretim Müşteri Ürün Tedarik Zinciri Organizasyonel Yapı	Türkiye'deki 100 KOBİ'nin ortalama D3A skoru 1,26/4 olarak hesaplanmıştır. Tedarik zinciri boyutunun en düşük olgunluk seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir.
(Ünal vd., 2022) [12]	İmalat	SANOL	Strateji ve Yönetim Müşteriler ve Tedarikçiler Çalışanlar ve Kurum Kültürü Teknoloji Veri ve Güvenlik Destekler ve Teşvikler	Türkiye'deki 87 işletme incelenmiştir. İşletmelerin çoğunun olgunluk seviyesinin düşük olduğu ve "Destekler ve teşvikler" boyutunun bu modele özgü olduğu belirtilmiştir.
(Demir vd., 2022) [31]	Makine Enerji Tekstil ve Gıda	ASTZHO	Endüstri 4.0 araçlarının, sürdürülebilirlik boyutlarına olan katkısını, farklı seviyelerde (anlaşılma, uygulanma, gelişim) incelemektedir.	Türkiye'deki 120 KOBİ'nin Endüstri 4.0 araçlarına yönelik farkındalık seviyelerinin orta düzeyde olduğu belirlenmiştir. Olgunluk seviyelerinin ise sektöre ve incelenen boyutlara göre farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir.
Chen vd. (2022)	KOBİ'ler	DEMATEL-ANP ve Bulanık Kapsamlı Değerlendirme Yöntemi	Strateji, Organizasyon ve İnsanlar Bilgi Teknolojileri Süreç ve Yönetim Entegrasyon İnovasyon	Model, Çin'deki KOBİ'lere uygulanmıştır. Dijital strateji ve bilgi teknolojilerinin kilit rol oynadığı, dijital süreç ve inovasyonun ise temel sorun alanları olduğu sonucuna varılmıştır.
(Merdin vd., 2023) [18]	Belirtilmemiş	7 Boyutlu Model	Strateji Müşteri Çalışan Süreç Yönetimi Teknoloji ve Veri Yönetimi Organizasyonel Kültür İnovasyon	Türkiye'deki işletmelerde yapılan analizlerde, çevresel faktörlerin olgunluk modellerinde yeterince dikkate alınmadığı tespit edilmiştir.
Senna vd. (2023)	İmalat	TOE Çerçevesine Dayalı Model	Teknoloji Organizasyon Çevre	Portekiz'deki 24 firma üzerinde odak grup çalışması ve vaka araştırması gerçekleştirilmiştir. Mevcut olgunluk modellerinin çevre boyutunu yeterince dikkate almadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 1: (Devamı)

Referans	Sektör	Olgunluk Modeli	Boyutlar	Uygulama ve Öne Çıkan Bulgular
(Akyüz ve Balkan, 2024) [34]	Cam Balkon İmalatı	Akıllı Üretim Olgunluk Modeli	Bilgi Kullanılabilirliği Teknolojik Organizasyonel Yönetimsel ve İnsan Kaynakları Olgunluğu	Türkiye'deki bir cam balkon üreticisi için olgunluk modeli uygulanmış ve iyileştirme önerileri sunulmuştur.
Sukrat ve Leeraphong, (2024)	Mikro İşletmeler	4 Boyutlu Model	İş Stratejisi Süreç Teknoloji İnsan	Tayland'daki 12 mikro işletme incelenmiştir. Gelişmekte olan ülkelerdeki mikro işletmelerin dijital dönüşümünün yavaş ilerlediği tespit edilmiştir.

Tablo 1'de özetlenen literatürdeki çalışmalar, dijital olgunluk modellerinin farklı sektörlerde, farklı ülkelerde ve farklı ölçekteki firmalarda uygulanabileceğini göstermektedir. Bu modeller, firmaların dijital dönüşüm süreçlerindeki mevcut durumlarını değerlendirmelerine, güçlü ve zayıf yönlerini belirlemelerine ve iyileştirme alanlarına odaklanmalarına yardımcı olmaktadır. İncelenen modeller, genel olarak teknoloji, organizasyon, strateji, insan ve süreç gibi boyutları ele alırken, bazılarında müşteri, veri, inovasyon ve çevresel faktörler gibi boyutlar da dikkate alınmıştır. Modellerin uygulanmasında ise anket, mülakat, vaka çalışması ve AHP, TOPSIS, VIKOR gibi çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada ise metal işleme sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın dijital olgunluk seviyesi belirlenmiştir. Ancak bu araştırma, literatürdeki benzerlerinden ayrılarak yalnızca firmanın dijital olgunluk seviyesini belirlemekle kalmamış, aynı zamanda bu seviyeyi sektördeki genel olgunluk seviyeleriyle karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma, Yıldız'ın çalışmasında yer alan metal işleme sektöründeki veriler temel alınarak yapılmış ve böylece firmanın dijital olgunluk düzeyinin sektörel

konumunu daha net bir şekilde ortaya koymuştur [22]. Bu kapsamlı analiz, çalışmanın sektörel bakış açısını güçlendirmekte ve literatüre Türkiye'deki metal işleme sektöründeki bir KOBİ'nin dijital olgunluk seviyesinin D3A modeli ile derinlemesine incelenmesi ve sektör ortalamaları ile karşılaştırılması yoluyla özgün bir katkı sunmaktadır.

3. ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ

Araştırma Şekil 1'de gösterilen adımlarla gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, araştırmanın kapsamı ve hedefleri belirlenmiş ve dijital olgunluk seviyesinin ölçülmesinde kullanılacak olan D3A modeli seçilmiştir. Planlama aşamasında, çalışma konusu olan firmanın faaliyet alanı ve dijital dönüşüm ihtiyaçları göz önünde bulundurularak anket soruları bu modele göre uyarlanmıştır. Anket formu, firmanın çeşitli departmanlarından çalışanlarla gerçekleştirilen görüşmeler yoluyla toplanmıştır. Anketler, analiz edilen şirketin dijital olgunluk seviyesini doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla, organizasyonun farklı kademelerindeki çalışanlara dağıtılmıştır. Katılımcılar, anket sorularına iş süreçleri, teknoloji kullanımı ve dijital yetkinlikler

hakkında geri bildirim sağlayarak, ilgili işletmenin mevcut dijitalleşme düzeyi hakkında bilgi sunmuştur. Anketlerden elde edilen veriler, D3A olgunluk modelinin kriterlerine göre analiz edilmiştir. Bu analiz sayesinde araştırma kapsamındaki fabrikanın dijital olgunluk seviyesinin çeşitli boyutlarda ne düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Böylelikle, işletmenin mevcut dijitalleşme durumu detaylı bir şekilde değerlendirilebilmiştir. Anket sonuçları, dijital olgunluk modeli çerçevesinde değerlendirilmiş ve istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, çalışma konusu olan firmanın dijital

dönüşüm sürecindeki güçlü ve gelişime açık yönlerinin belirlenmesine olanak tanımıştır. Ayrıca sonuçlar Yıldız'ın çalışmasındaki sektör ortalamaları ile birlikte sanayi bölgesinden elde edilen genel ortalamalarla da karşılaştırılarak söz konusu firmanın sektördeki yeri belirlenmiştir [22]. Son olarak, araştırmanın bulguları bir rapor halinde sunulmuş ve firmanın üst yönetimiyle paylaşılmıştır. Rapor, ilgili işletmenin dijital olgunluk seviyesinin detaylı bir değerlendirmesini içermiş ve dijital dönüşüm yolculuğunda izlenecek stratejiler konusunda geri bildirim ve öneriler sağlamıştır.



Şekil 1: Araştırma metodolojisinin adımları.

4. YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada dijital olgunluk modeli olarak tercih edilen araç, özellikle KOBİ'lerin dijital dönüşüm süreçlerini değerlendirmek amacıyla tasarlanmış olan D3A olarak belirlenmiştir. Model, Boğaziçi Üniversitesi Endüstri 4.0 Platformu tarafından geliştirilmiştir.

D3A, işletmelerin dijital dönüşüm ihtiyaçlarını belirleme, bu ihtiyaçları takip etme ve dönüşüm sürecinin sağladığı faydayı ölçme amacını taşımaktadır. D3A; organizasyonel yapı, müşteri yönetimi, ürün geliştirme, tedarik zinciri yönetimi ve üretim yönetimi olmak üzere 5 ana boyuta sahiptir [22].

Organizasyonel yapı boyutunda değerlendirilen unsurlar, karar alma süreçleri, departmanlar arası işbirliği, strateji oluşturma metodolojileri, dijital

dönüşüm stratejileri, personel gelişimi ve eğitimleri, bilişim teknolojisi altyapısı ve veri yönetimi gibi konuları içerir. Bu kriterler, beş ayrı düzeyde incelenir ve her bir kriter için belirlenen seviyelendirme sistemi, farklı yaklaşımları içerebilir. Bu yaklaşımlar belirlenirken, katılımcılara belirli seviyeler arasında seçim yapma imkanı tanınmamıştır; bunun yerine, katılımcıların serbest cevaplarına dayanarak hangi seviyeye daha yakın oldukları belirlenmiş ve buna göre seviyelendirme yapılmıştır.

Müşteri yönetimi kriteri altında ele alınan konular arasında satış, pazarlama, sipariş yönetimi, bayilik ilişkileri, müşteri veri yönetimi ve satış sonrası hizmetler bulunur. Ürün geliştirme başlığı altında, Ür-Ge ve Ar- Ge yapıları, inovasyon faaliyetleri, ürün özelleştirme süreçleri, ürün

dijitalleşmesi ve üründen elde edilen veriye dayalı yeni ürün ve hizmetlerin oluşturulması gibi faktörler incelenir.

Tedarik zinciri yönetimi kriteri, planlama, malzeme gereksinimi planlama, tedarik yönetimi, stok yönetimi, depo yönetimi ve sevkiyat süreçlerini kapsar. Bu süreçlerin her biri için belirlenen seviyelere karşılık gelen durumlar incelenir ve değerlendirilir.

Son olarak, üretim yönetimi kapsamında, iş emirleri, üretim planlaması, makinelerin durumu, malzeme hareketleri, kalite kontrol ve bakım faaliyetleri gibi unsurlar ele alınır. Bu unsurlar altında, belirlenen seviyelere karşılık gelen durumlar ayrıntılı bir şekilde incelenir ve analiz edilir.

Modelin içerdiği 5 boyut ve 29 alt boyut Tablo 2'de verilmektedir. Şekil 2'de ise soruların boyutlara göre dağılımı verilmiştir. Bu değerlendirme aracındaki cevaplar, 0-4 arasındaki bir skalada eşit ağırlıkta puanlandırılmıştır [22].

Tablo 2: Boyutlar ve alt boyutlar [22].

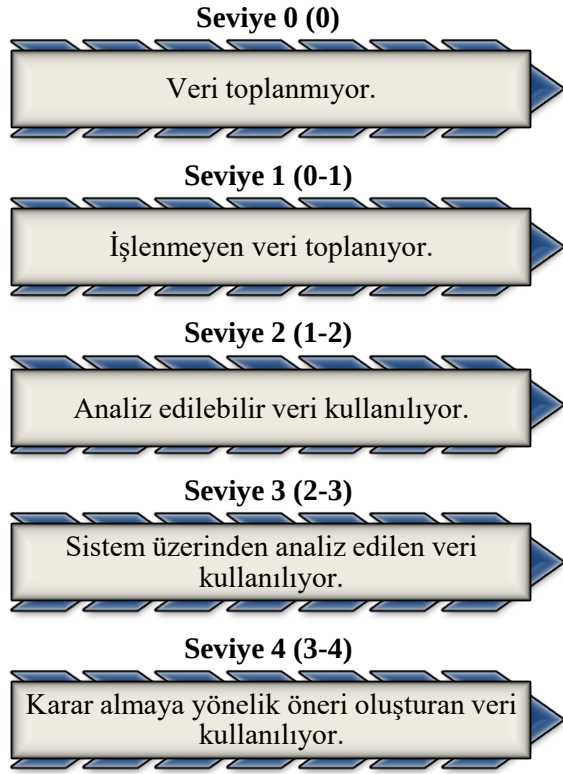
Boyut	Alt Boyutlar
Organizasyonel Yapı	Karar alma yöntemleri
	Birimler arası işbirliği
	Strateji geliştirme yöntemi
	Dijitalleşme stratejisi
	İş süreçleri
	Çalışan gelişim ve eğitimleri
	Bilişim teknolojisi yapılanması
Müşteri Yönetimi	Veri kullanımı
	Satış
	Pazarlama
	Sipariş
	Bayilik
	Müşteri verisi
	Satış sonrası hizmetler
Boyut	Alt Boyutlar

Ürün Geliştirme	Ür-Ge ve Ar-Ge yapısı
	İnovasyon faaliyetleri
	Ürün özelleştirilmesi
	Ürünlerin dijitalleşmesi
	Üründen toplanan veriye ilişkin yeni ürün ve hizmet yaratılması
Tedarik Zinciri Yönetimi	Planlama ve Malzeme gereksinimi
	Planlama
	Tedarik
	Stok ve Depo
	Sevkiyat
Üretim Yönetimi	İş emirleri
	Çizelgeleme
	Duruşlar
	Malzeme hareketleri
	Kalite ve bakım



Şekil 2: Soruların boyutlara göre dağılımı [22].

Dijital dönüşüm süreci Şekil 3'te görüldüğü gibi aşamalı olarak ilerler [22]. İlk aşamada veri toplama yönergeleri hazırlanır ve süreçler tanımlanır. İkinci aşamada, süreçler belirlenen sistemlerle yürütülür ve analiz edilebilir veri elde edilir. Üçüncü aşama, bütünsel sistemlerin ve karar destek sistemlerinin kullanımını içerir. Dördüncü ve en ileri aşamada, tüm birimler arasında veri paylaşımı, nesnelerin internetiyle izleme ve verinin gerçek zamanlı analiziyle yeni ürün ve hizmetlerin ortaya çıkması sağlanır. Bu aşama, işletmelerin veri odaklı kararlar almasını ve sürekli olarak yenilik yapmasını teşvik eder.



Şekil 3: Olgunluk seviyesi aralıkları [22].

Model, Boğaziçi Üniversitesi Endüstri 4.0 Platformu tarafından yüz yüze görüşme yöntemi ile uygulanan anket sorularıyla şekillendirilmiştir. İstanbul'da Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren 100 işletmeye uygulanarak test edilmiştir. Bu test aşamasında, modelin özellikle üretim endüstrisinde faaliyet gösteren KOBİ'ler için uygun olup olmadığını değerlendirmişlerdir [22]. Bu bağlamda, D3A'nın geniş bir uygulama yelpazesine sahip olması ve yerel bir endüstri bölgesinde başarılı bir şekilde test edilmiş olması, bu çalışmada dijital olgunluk modeli olarak tercih edilmesine temel oluşturmuştur. D3A modeli, 5 boyut ve 65 sorudan oluşan yapıyla, KOBİ'ler için özel olarak tasarlanmış pratik bir dijital olgunluk değerlendirme aracıdır. Bu sayede, KOBİ'ler için karmaşık olmayan, ancak kapsamlı bir analiz imkanı sunar. Yüz yüze veri toplama yöntemi, katılımcılardan daha derinlemesine geri bildirim

alınmasına olanak tanırken, aynı zamanda modelin uygulanabilirliğini artırır. Ancak, 65 sorunun varlığı, bazı KOBİ'ler için zaman alıcı olabilir ve anketin tamamlanma oranını etkileyebilir. Diğer olgunluk modellerine kıyasla, D3A'nın sınırlı boyut sayısı, detaylı analiz yapma potansiyelini kısıtlarken, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerini daha hızlı anlamalarını ve geliştirmelerini sağlar. Sonuç olarak, D3A modeli, KOBİ'lerin ihtiyaçlarına yönelik uygun bir çözüm sunarken, bazı derinlemesine analiz gerektiren durumlarda sınırlı kalabilir.

5. ÇALIŞMANIN SINIRLILIKLARI VE VARSAYIMLAR

Bu çalışmada, metal işleme sektöründeki tek bir firmanın dijital olgunluk seviyesi değerlendirilmiş olup, sonuçlar sektör genelindeki ortalamalarla karşılaştırılmıştır. Ancak, çalışmanın yalnızca tek bir firmaya dayanması, sonuçların genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Ayrıca, anket sorularına dayalı veriler öznel görüşlere dayandığından, katılımcıların kişisel değerlendirmeleri sonuçları etkileyebilir. Çalışmada kullanılan D3A modeli, dijital olgunluğun belirli boyutlarını ele almakla birlikte, daha derinlemesine analiz gerektiren durumlarda sınırlı kalabilir.

Yapılan araştırmada, firmanın dijital dönüşüm sürecine dair veriler D3A modeline uygun olarak toplanmış ve analiz edilmiştir. Firmadan elde edilen verilerin doğruluğu ve güncelliği kabul edilerek analiz yapılmıştır. Ayrıca, çalışmanın yürütüldüğü dönemde firmanın iş yapış şekilleri ve organizasyonel yapısının sabit olduğu varsayılmıştır.

6. UYGULAMA (APPLICATION)

D3A, metal işleme sektöründe faaliyet gösteren

bir imalat işletmesinde uygulanmıştır. Araştırma kapsamındaki fabrika; Isıtma Sistemleri, Geri Kazanım Üniteleri, Arıtma Sistemleri, Enerji Sistemleri gibi tesislerin yapımı ve bu tesislerde yer alan makine ve ekipmanların üretimine kadar uzanan geniş bir uygulama alanına sahiptir.

D3A kullanılarak, şirkete modelin tüm boyutlarını içeren anket soruları yüz yüze görüşme yöntemi ile uygulanmıştır. Soru seti, toplamda 65 sorudan oluşmaktadır ve mantıksal bir akış içinde ilerlemektedir. Bu nedenle, bazı durumlarda belirli sorular olumsuz cevaplar verildiğinde, ardışık sorular atlanabilir veya birkaç soru aynı cevap içinde yer alabilir. Bu soruların genellikle bir buçuk ila iki saatlik bir süreçte, katılımcılarla yapılan bir sohbet esnasında sorulup cevaplanması mümkündür. Mülakatlar sırasında, iki kişilik bir ekip bulunmuş; bir kişi soruları yönlendirirken diğer kişi notlar almıştır. Dijital değerlendirme aracındaki boyutlara ait sorular ilgili birim sorumlularına yönlendirilmiştir. Ziyaretlerin ardından, elde edilen cevaplar 0 ile 4 arasında değişen seviyeleri temsil eden notlara dönüştürülmüştür. Her bir sorunun eşit ağırlığa sahip olduğu kabul edilerek yapılan değerlendirmeler, metal işleme endüstrisinde faaliyet gösteren seçili firmanın farklı boyutlardaki olgunluk puanlarını ortaya çıkarmıştır.

D3A'nın organizasyonel yapı boyutundaki 12 soru ilgili işletmenin üst düzey yöneticisine yöneltilmiştir ve bu kapsamda sağlanan cevaplar incelendiğinde firma bu boyutta 1,86 puan elde ederek genel olarak başarılı bir performans sergilemektedir. Bu başarı, karar alma yöntemleri, birimler arası işbirliği, strateji

geliştirme yöntemleri, dijitalleşme stratejisi ve çalışan gelişimi gibi alanlarda sağlam bir yapıya işaret etmektedir.

Satış ve Pazarlama Departmanı yöneticisi ile müşteri yönetimi boyutundaki 12 soru görüşülmüş ve bu kapsamda alınan cevaplar değerlendirilerek not alınmıştır. Analiz edilen firmanın müşteri yönetimi konusundaki performansı 0,82 puan ile ölçülmüştür. Bu sonuçlar, firmanın müşteri yönetimi alanında daha fazla iyileştirme potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Ürün geliştirme boyutundaki 10 soru için analiz edilen firmanın üst düzey yöneticisi ile görüşülerek, bu alanda 0,91 puan elde edilmiştir. Ar-Ge yapısı, inovasyon faaliyetleri ve ürünlerin dijitalleşmesi konularında orta düzeyde bir başarı elde edilmiştir. Ancak, ürün özelleştirilmesi ve yeni ürün/hizmet yaratma konularında daha fazla geliştirme fırsatları bulunmaktadır.

Satın alma departmanı yöneticisine tedarik zinciri yönetimi boyutundaki 16 soru yöneltilmiş ve firma bu alanda 1,19 puan almıştır. Analiz edilen firmanın genel olarak başarılı olduğu görülmüştür. Planlama, tedarik, stok/depo yönetimi ve sevkiyat gibi alt boyutlarda güçlü bir performans sergilenmiştir.

Üretim yönetimi boyutu için firmanın üretim müdürü ile görüşülmüş ve bu alanda 0,42 puan elde edilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, ilgili işletmenin iş emirleri, çizelgeleme ve kalite/bakım gibi konularda daha fazla iyileştirme potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Firmanın daha etkin üretim süreçleri için önlemler alınması önerilebilir.

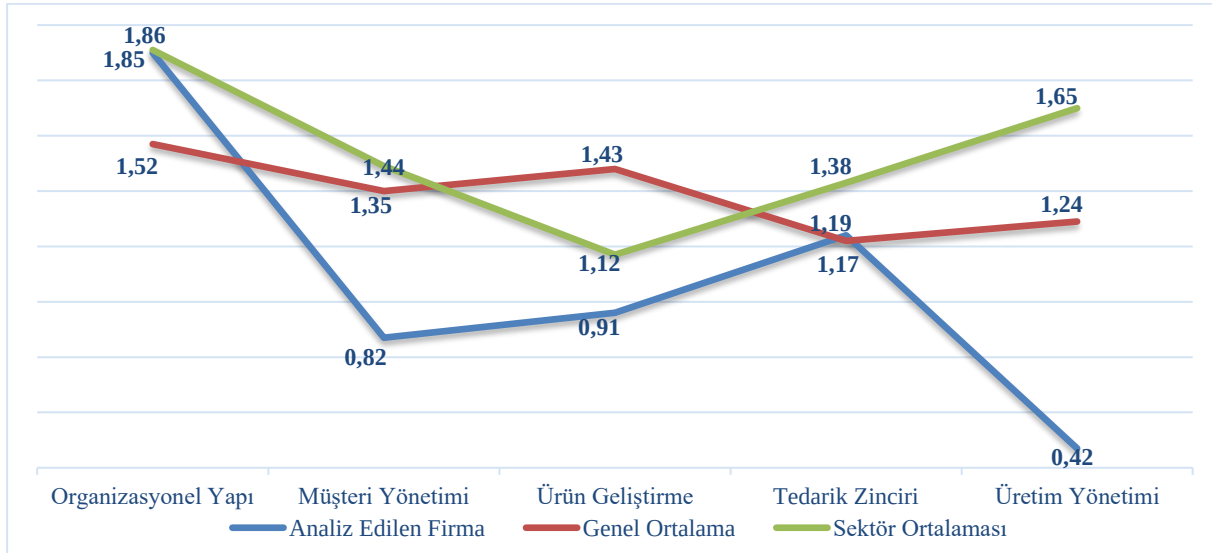
D3A'nın geliştirilme sürecinde, Türkiye'deki

çeşitli sektörlerden 100 farklı firma üzerinde test edilmiştir. Bu testler, D3A'nın etkinliğini değerlendirmek ve farklı endüstrilerden işletmelerin dijital olgunluk seviyelerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma konusu olan firmanın olgunluk puanları, Yıldız'ın çalışmasında; sanayi bölgesindeki metal işleme sektöründe ve bölgede yer alan firmaların genel verileriyle karşılaştırılabilir [22]. Dijital dönüşüm sürecindeki performansı değerlendirmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, firmanın organizasyonel yapı boyutunda sektör ortalamasına yakın bir performans sergilediği, ancak müşteri yönetimi ve ürün geliştirme alanlarında sektör ve genel ortalamaların altında kaldığı gözlemlenmektedir. Özellikle müşteri yönetimi ve ürün geliştirme boyutlarında araştırma kapsamındaki fabrika, diğer sektör katılımcılarına kıyasla belirgin bir performans düşüklüğü göstermektedir. Bununla

birlikte, tedarik zinciri yönetimi boyutunda ilgili işletmenin sektör ortalamasının üzerinde bir performans sergilediği belirlenmiştir. Ancak, üretim yönetimi boyutunda firmanın belirgin bir şekilde geride kaldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, analiz edilen şirketin dijital dönüşüm seviyesi sektör ve genel ortalamaların altında olduğundan, daha etkin stratejiler geliştirmesi ve operasyonel alanlarda iyileştirmeler yapması gerekmektedir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma, metal işleme sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın dijital olgunluk seviyesini, Boğaziçi Üniversitesi'nin geliştirdiği D3A'yı kullanarak analiz etmiş ve sektörel kıyaslamalarla zenginleştirilmiştir. Ancak sadece sektörle değil, sanayi bölgesinden elde edilen genel ortalamalarla da karşılaştırmalar yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4: Olgunluk puanları.

Firmanın organizasyonel yapı boyutunda aldığı 1,85 puan, sanayi bölgesindeki metal sektörünün ortalama puanı olan 1,86'ya oldukça yakın bir performans sergilemektedir. Ayrıca, firmanın bu

boyutta sanayi bölgesinin genel ortalamasının (1,52) üzerinde performans göstermesi, organizasyon yapısındaki güçlü yönleri işaret etmektedir. Bu sonuç, firmanın karar alma

süreçleri, dijitalleşme stratejileri ve birimler arası işbirliğinde başarılı olduğunu göstermektedir.

Müşteri yönetimi boyutunda ise firmanın aldığı 0,82 puan, hem metal sektörünün ortalaması olan 1,44'ün hem de sanayi bölgesindeki genel ortalama olan 1,35'in oldukça altındadır. Bu durum, firmanın müşteri ilişkileri yönetimi, sipariş süreçleri ve satış sonrası hizmetlerde ciddi iyileştirmelere ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Özellikle müşteri yönetiminin dijitalleşmesi firmanın rekabet avantajını artırmada kritik bir öneme sahiptir.

Firmanın ürün geliştirme performansı da zayıf bir tablo çizmektedir; alınan 0,91 puan, metal sektöründeki 1,12 puanın gerisinde kalırken, sanayi bölgesindeki genel ortalama olan 1,43'e de oldukça uzak bir performans sergilenmiştir. Bu, firmanın inovasyon faaliyetlerinde ve dijital ürün geliştirme süreçlerinde iyileştirme yapma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Tedarik zinciri yönetimi boyutunda firmanın 1,19 puan alması, metal sektöründeki 1,38 puanlık ortalamaya yakın bir sonuç sergilerken, sanayi bölgesinin genel ortalaması olan 1,17'ye göre ise daha iyi bir performans göstermektedir. Bu alan, firmanın genel olarak başarılı olduğu, ancak tedarik süreçleri ve stok yönetimi gibi konularda daha fazla iyileştirme yapabileceği bir alandır.

En zayıf performans, firmanın üretim yönetimi boyutunda ortaya çıkmıştır. Firmanın aldığı 0,42 puan, metal sektöründeki 1,65 puanlık ortalamanın oldukça altında kalırken, sanayi bölgesindeki genel ortalama olan 1,24 puanın da gerisindedir. Bu durum, firmanın üretim süreçlerinde dijitalleşme ve otomasyon alanında ciddi eksiklikler olduğunu ve bu alanın, firmanın

rekabet gücünü artırabilmesi için en çok geliştirilmesi gereken alan olduğunu göstermektedir.

Genel dijital olgunluk seviyesi 1,03 olan firma, metal sektöründeki 1,49 ortalamanın ve sanayi bölgesindeki genel ortalamanın (1,26) gerisinde kalmıştır. Bu sonuçlar, firmanın dijital dönüşüm stratejilerini daha etkin bir şekilde geliştirmesi gerektiğini ve özellikle müşteri yönetimi, ürün geliştirme ve üretim yönetimi gibi kritik alanlarda dijital teknolojileri daha hızlı benimsemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, firmanın dijital olgunluk seviyesi sanayi bölgesindeki genel ortalamaya göre düşük, ancak sektördeki ortalamaya kıyasla daha büyük gelişim potansiyeline sahiptir. Özellikle üretim ve müşteri yönetimi gibi kilit süreçlerde dijitalleşme hızlandırıldığında, firmanın rekabet avantajını artırabileceği öngörülmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu zayıf alanları geliştirmek için stratejiler belirleyebilir ve firmanın dijital dönüşüm yolculuğunu hızlandırabilir.

8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, metal işleme sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın dijital olgunluk seviyesi, Boğaziçi Üniversitesi'nin geliştirdiği D3A kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, firmanın organizasyonel yapı ve tedarik zinciri yönetimi alanlarında sektör ortalamasına yakın bir performans sergilediğini, ancak müşteri yönetimi, ürün geliştirme ve özellikle üretim yönetimi gibi alanlarda sektör ortalamasının gerisinde kaldığını göstermektedir. Dijital dönüşümde başarılı olabilmek için firmanın bu zayıf yönlerini gidermesi ve özellikle üretim süreçlerini dijitalleştirerek iyileştirmesi

gerekmektedir. Çalışmanın bulguları, firmanın dijitalleşme sürecinde nerede olduğunu netleştirmekte ve dijital dönüşüm stratejilerini şekillendirmek için yol gösterici bir nitelik taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarla, daha geniş bir örneklem üzerinde sektörel kıyaslamalar yapılarak dijital olgunluğun işletmeler üzerindeki etkileri daha kapsamlı şekilde incelenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI

Sultan GÜL ÖZDAMAR: Kavramsal tasarım, veri düzenleme, analiz, araştırma, kaynaklar, görselleştirme, yazma - taslak; düzenleme.

Beste DESTİCİOĞLU TAŞDEMİR: Kavramsal tasarım, kaynaklar, yazma - gözden geçirme ve düzenleme, denetim, onaylama.

Süleyman ERSÖZ: Metodoloji, kaynaklar, düzenleme, denetim, onaylama.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Schumacher, S. Erol, ve W. Sihn, “A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises”, içinde Procedia CIRP, 2016. doi: 10.1016/j.procir.2016.07.040.
- [2] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, ve M. Hoffmann, “Industry 4.0”, Business and Information Systems Engineering, c. 6, sy 4, ss. 239-242, Ağu. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [3] D. Dikhanbayeva, S. Shaikholla, Z. Suleiman, ve A. Turkyilmaz, “Assessment of industry 4.0 maturity models by design principles”, 01 Aralık 2020, MDPI. doi: 10.3390/su12239927.
- [4] R. C. Santos ve J. L. Martinho, “An Industry 4.0 maturity model proposal”, Journal of

Manufacturing Technology Management, c. 31, sy 5, ss. 1023-1043, Kas. 2020, doi: 10.1108/JMTM-09-2018-0284.

[5] B. Gajsek, J. Marolt, B. Rupnik, T. Lerher, ve M. Sternad, “Using maturity model and discrete-event simulation for industry 4.0 implementation”, International Journal of Simulation Modelling, c. 18, sy 3, ss. 488-499, Eyl. 2019, doi: 10.2507/IJSIMM18(3)489.

[6] A. Aktepe, D. Tunçbilek, S. Ersöz, A. F. İnal, ve A. K. Türker, “Comparison of Investment Options and an Application in Industry 4.0”, içinde ICAII4.0 - International Conference on Artificial Intelligence towards Industry 4.0, 2018.

[7] B. Baki ve D. Serdar, “Sanayi 4.0 Olgunluk Düzeyinin Değerlendirilmesine Yönelik Çok Kriterli Bir Yaklaşım: Lojistik Sektörü Uygulaması”, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, c. 38, sy 4, 2020, doi: 10.17065/huniibf.693578.

[8] H. F. Braga Tadeu, A. L. de Castro Moura Duarte, C. Taurion, ve G. L. Jamil, “Digital Transformation: Digital Maturity Applied to Study Brazilian Perspective for Industry 4.0”, içinde Best Practices in Manufacturing Processes, Cham: Springer International Publishing, 2019, ss. 3-27. doi: 10.1007/978-3-319-99190-0_1.

[9] M. Asiloğulları Ayan ve S. Çakır, “Sanayi Yönetiminde Gelecek Yaklaşımları Dijitalleşme ve Yetenekler”, içinde Endüstri 5.0 Işığında İşletmelerde Teknoloji Trendleri, Öğretim Üyesi Tuğrul Oğuzhan ve Arş Gör Şeyda Ok, Ed., Ankara: Nobel Yayınları, 2023, ss. 245-261. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.nobelkitap.com

[10] M. Spaltini, F. Acerbi, M. Pinzone, S. Gusmeroli, ve M. Taisch, “Defining the Roadmap towards Industry 4.0: The 6Ps Maturity Model for Manufacturing SMEs”, içinde Procedia CIRP, Elsevier B.V., 2022, ss. 631-636. doi: 10.1016/j.procir.2022.02.105.

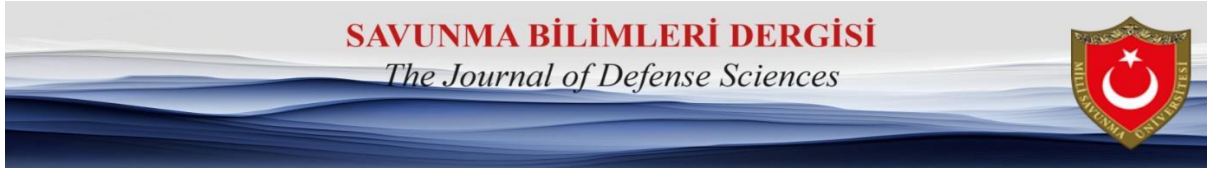
[11] L. D. Rafael, G. E. Jaione, L. Cristina, ve S. L. Ibon, “An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies”, Technol Forecast Soc Change, c. 159, 2020, doi: 10.1016/j.techfore.2020.120203.

[12] C. Ünal, C. Sungur, ve H. Yildirim, “Application of the Maturity Model in Industrial Corporations”, Sustainability (Switzerland), c. 14, sy 15, 2022, doi: 10.3390/su14159478.

[13] Bakanlar Kurulu, “Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerin Tanımı, Nitelikleri ve Sınıflandırması Hakkında Yönetmelik”, 2005.

[14] L. R. Moura ve H. Kohl, “Maturity assessment in industry 4.0 – a comparative analysis of brazilian and german companies”, Emerging Science

- Journal, c. 4, sy 5, ss. 365-375, 2020, doi: 10.28991/esj-2020-01237.
- [15] M. Colli, O. Madsen, U. Berger, C. Möller, B. V. Wæhrens, ve M. Bockholt, “Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0”, Elsevier B.V., Oca. 2018, ss. 1347-1352. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.343.
- [16] U. Şener, E. Gökalp, ve P. E. Eren, “Towards a Maturity Model for Industry 4.0: A Systematic Literature Review and a Model Proposal Industry 4.0 From The Management Information Systems Perspectives”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/335652665>
- [17] E. Gökalp ve V. Martinez, “Digital transformation capability maturity model enabling the assessment of industrial manufacturers”, Comput Ind, c. 132, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103522.
- [18] D. Merdin, F. Ersoz, ve H. Taskin, “Digital Transformation: Digital Maturity Model for Turkish Businesses”, Gazi University Journal of Science, c. 36, sy 1, ss. 263-282, 2023, doi: 10.35378/gujs.982772.
- [19] S. R. Hamidi, A. A. Aziz, S. M. Shuhidan, A. A. Aziz, ve M. Mokhsin, “SMEs maturity model assessment of IR4.0 digital transformation”, içinde Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018. doi: 10.1007/978-981-10-8612-0_75.
- [20] A. De Carolis, M. Macchi, E. Negri, S. Terzi, ve S. A. Terzi, “A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies”, ss. 13-20, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-66923.
- [21] SGK, “SGK 2023 Yılı İstatistikleri”, 2023.
- [22] S. Yildiz, “Development of a Digital Maturity Model for Small and Medium Sized Enterprises: A Case Study in Turkey”, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
- [23] K. Lichtblau vd., “Industrie 4.0 Readiness”, 2015. Erişim: 14 Ekim 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-english.pdf>
- [24] Kaltenbach Fabian, Marber Patrick, Gosemann Clarissa, Bölts Tom, ve Kühn Ansgar, “Smart Services Maturity Level in Germany”, IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, 2018.
- [25] L. Bibby ve B. Dehe, “Defining and assessing industry 4.0 maturity levels–case of the defence sector”, Production Planning and Control, c. 29, sy 12, ss. 1030-1043, Eyl. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1503355.
- [26] A. Schumacher, T. Nemeth, ve W. Sihn, “Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises”, içinde Procedia CIRP, 2019. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.110.
- [27] G. T. Temur, H. B. Bolat, ve S. Gözlü, “Evaluation of Industry 4.0 Readiness Level: Cases from Turkey”, içinde Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-92267-6_36.
- [28] T. C. Lin, K. J. Wang, ve M. L. Sheng, “To assess smart manufacturing readiness by maturity model: a case study on Taiwan enterprises”, Int J Comput Integr Manuf, c. 33, sy 1, ss. 102-115, Oca. 2020, doi: 10.1080/0951192X.2019.1699255.
- [29] O. K. K. Bandara, V. K. Tharaka, ve A. P. R. Wickramarachchi, “Industry 4.0 maturity assessment of the Banking Sector of Sri Lanka”, Smart Computing and Systems Engineering, 2019.
- [30] A. A. Wagire, R. Joshi, A. P. S. Rathore, ve R. Jain, “Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice”, Production Planning and Control, c. 32, sy 8, 2021, doi: 10.1080/09537287.2020.1744763.
- [31] S. Demir, G. Sarıışık, ve A. S. Öğütlü, “KOBİ lerin Endüstri 4.0 Farkındalık ve Olgunluk Seviyesinin Belirlenmesi: Şanlıurfa İli Örneği (Determination of Industry 4.0 Awareness and Maturity Level of SMEs: The Example of Şanlıurfa Province)”, Journal of Business Research - Turk, 2022, doi: 10.20491/isarder.2022.1543.
- [32] Q. Chen, W. Zhang, N. Jin, X. Wang, ve P. Dai, “Digital Transformation Evaluation for Small- and Medium-Sized Manufacturing Enterprises Using the Fuzzy Synthetic Method DEMATEL-ANP”, Sustainability (Switzerland), c. 14, sy 20, 2022, doi: 10.3390/su142013038.
- [33] P. P. Senna, A. C. Barros, J. Bonnin Roca, ve A. Azevedo, “Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the technology-organization-environment framework”, Comput Ind Eng, c. 185, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109645.
- [34] G. A. Akyüz ve D. Balkan, “Smart manufacturing maturity assessment: a Turkish case study in glass balcony manufacturing enterprise”, Smart Science, c. 12, sy 1, 2024, doi: 10.1080/23080477.2023.2263239.
- [35] S. Sukrat ve A. Leeraphong, “A digital business transformation maturity model for micro enterprises in developing countries”, Global Business and Organizational Excellence, c. 43, sy 2, 2024, doi: 10.1002/joe.22230.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

Examining the Factors Driving Military Innovation Using the Fuzzy DEMATEL Method: A Case Study of Türkiye

Bulanık DEMATEL Yöntemi Kullanılarak Askeri İnovasyona Yön Veren Faktörlerin İncelenmesi: Türkiye'de Bir Vaka Çalışması

Selçuk CANTÜRK ^{1*} Fahri Alp ERDOĞAN ² Murat SAĞBAŞ ²

¹Milli Savunma Üniversitesi, ATASAREN, Askeri Sosyoloji ABD, İstanbul, Türkiye

²Milli Savunma Üniversitesi, ATASAREN, Savunma Yönetimi ABD, İstanbul, Türkiye.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11.09.2024
Düzeltilme: 15.12.2024
Kabul: 19.12.2024

Keywords

Military Innovation
Fuzzy DEMATEL
Türkiye Military
Prioritization of
Innovation Factors

Anahtar Kelimeler

Askeri Yenilik
Bulanık DEMATEL
Türk Ordusu
Yenilik Faktörlerini
Önceliklendirme

Abstract

The study explores the perception of military innovation in Türkiye with the primary objective of defining this perception and prioritizing the factors that drive military innovation. While the existing literature on military innovation is limited, there is a noticeable absence of prioritization studies among them. Broadly, civilian influence, evolving threat perception, military and economic alliances, technological innovation, military culture, competition with rival armies, and operational requirements are identified as key factors within discussions on military innovation. The Fuzzy DEMATEL method was chosen in line with the research's objectives. A total of 7 participants, including civilian and military experts, as well as academics with expertise in military innovation and operating in Türkiye took part in the study. The research findings highlight the most crucial criteria driving military innovation, with competition with rival armies, technological innovation, military and economic alliances, changing threat perception, operational requirements, military culture, and civilian influence emerging as the most crucial. These findings have significant implications, as they underscore the need for increased awareness of the components of military innovation and call for further research in this area. Moreover, they have the potential to significantly influence and shape future strategies and policies in the field of military innovation.

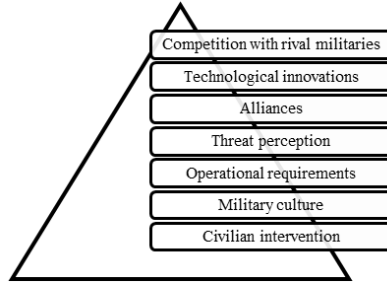
Özet

Araştırma Türkiye'deki askeri yenilik algısını konu edinmekte ve askeri yenilik algısını tanımlamak ve askeri yeniliği tetikleyen unsurların önceliklendirilmesini amaçlamaktadır. Literatürde askeri yeniliği yönelik çalışmalar sınırlı olmakla birlikte unsurlar arasında bir önceliklendirme yapılan çalışmanın olmadığı görülmüştür. Askeri yenilik tartışmaları kapsamında sivil etkisi, değişen tehdit algısı, askeri ve ekonomik ittifaklar, teknolojik yenilik, askeri kültür, rakip ordularla rekabet, operasyonel gereklilikler ana unsurlar olarak belirlenmiştir. Bulanık DEMATEL yöntem araştırmanın amacına uygun olarak tercih edilmiştir. Türkiye'de görev yapan ve askeri yenilik konusunda uzmanlığa sahip olan sivil ve askeri uzmanlar ile akademisyenlerden oluşan toplam 7 katılımcı araştırmada yer almıştır. Araştırma bulgularına göre askeri yeniliği tetikleyen en önemli kriterler sırasıyla; rakip ordularla rekabet, teknolojik yenilik, askeri ve ekonomik ittifaklar, değişen tehdit algısı, operasyonel gereklilikler, askeri kültür ve sivil etkisi şeklinde sıralandığı belirlenmiştir. Kriterlerin birbirleri üzerine etkisi analiz edildiğinde ise değişen tehdit algısı, sivil etkisi ve askeri kültür unsurlarının diğer askeri yenilik unsurlarını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular, askeri inovasyonun bileşenlerine ilişkin farkındalığın artırılması ihtiyacının altını çizdiği ve bu alanda daha fazla araştırma yapılması çağrısında bulunduğu ve potansiyel olarak gelecekteki stratejileri ve politikaları şekillendirdiği için önemli çıkarımlara sahiptir.

Highlights

The discourse surrounding military innovation has garnered considerable attention, revealing its significance for experts in Türkiye and the nation at large. Despite this vital engagement, the current body of literature addressing military innovation within the context of Türkiye remains notably scarce. This gap highlights the necessity for further scholarly inquiry and analysis in this critical area.

Graphical Abstract



*Corresponding author, e-mail: selcuk.canturk@msu.edu.tr

1. INTRODUCTION

The topic of military innovation has sparked extensive debate among scholars and experts in various fields. Disagreements stem from differing perspectives on the reasons behind and the methods through which militaries adapt and evolve. A review of the literature reveals that the triggering factors encompass civilian influence, evolving threat perceptions, military and economic alliances, technological innovation, military culture, competition with rival militaries, and operational requirements [1]. While these concepts will be further explored in detail, they are interconnected in dynamic and complex ways. There is no widely accepted understanding of the interplay and prioritization of factors that drive military innovation. Additionally, the literature indicates that these concepts are not consistently prioritized in the context of military innovation, and there is minimal research on the mutual influence of these concepts.

The debate surrounding the precipitating factors of military innovation remains pertinent within the context of Türkiye as well. For example, [2] emphasizes the significant role of the needs of the Turkish Armed Forces in the development of the Turkish defense industry. He asserts that the decline in Türkiye's domestic defense industry occurred following the accession to NATO. However, he posits that various embargoes have brought military innovation and the development of the defense industry to the fore. Another group of experts argues that political and military changes in the international system have triggered the military change. They also emphasize that the overt and covert embargoes

experienced by Türkiye have contributed to military innovation and the development of defense industry [3].

Kurç and Neuman's study examined the defense industries of developing countries. The obstacles to the development and self-sufficiency of Türkiye defense industry are listed as inefficient use of military capabilities/lack of planning, competition and confrontation in civil-military relations, overdependence on foreign technology and external pressures on autonomy [4]. In addition to these studies, which specifically focus on the development of the defense industry, other studies emphasize the impacts of Turkish military innovation in various areas. An edited volume draws on the authors' field experience [5]. Consequently, it is argued that changing threat perceptions and operational needs are the main driving forces behind military innovation. However, none of the above-mentioned studies focused on the relationship between the factors that trigger Turkish military innovation.

Contrary to previous studies, this article aims to contribute to the literature by examining the relationship between the factors that trigger military innovation with the DEMATEL method in line with expert opinions. The fact that this contribution is from an under-studied country such as Türkiye increases the value of the article. The first part of the study delves into the debate on military innovation, summarizing existing discussions in the literature. The subsequent section details the research methodology, specifically the use of the Fuzzy DEMATEL method within the context of the Turkish sample, along with information about the research process

and analysis. The findings section describes the results obtained after analysis, focusing on prioritizing the factors driving military innovation and creating a corresponding ranking, as presented in Table 7. Additionally, Figure 2 depicts an impact diagram illustrating the relationships between identified concepts.

2. MILITARY INNOVATION DEBATE

Since the 1980s, military innovation has become a subject of academic research, drawing contributions from various disciplines and sparking debates. Scholars have discussed the factors that drive military innovation, and this section summarizes those views, with more detailed information to follow. Barry Posen, who initiated the innovation studies in the 1980s, utilized organizational theory and balance of power theories to elucidate the factors instigating military innovation. Posen highlights the significance of civilian intervention in achieving military innovation [6]. Rosen, who has a contrasting perspective to Posen, argues that implementing promotion strategies is the most crucial method for a military to change during periods of peace. To foster innovation, esteemed senior military officials must acknowledge substantial structural shifts in the global security landscape and develop a new strategy after that. Subsequently, it is imperative to enhance the promotional prospects for young officers who can effectively adjust to this novel technique. Contrary to commonly held beliefs, the crucial factor for bringing about change is not financial resources but rather highly trained military men, sufficient time, and extensive information. Civilian intervention can be beneficial in safeguarding these leaders. Terriff and Farrell,

however, contend that the factors that initiate or impede military innovation originate from institutional culture and military culture [7]. Kimberly Marten highlights the significance of organizational resistance in military innovation. She argues that the catalyst for innovation is the implementation of innovative measures that guarantee the independence of the military framework. Furthermore, he underscores that advancements in the armed forces of competing nations stimulate military progress [8].

Deborah Avant highlights that the key factors that facilitate military innovation are the ability of institutions to adapt and be flexible, as well as the level of transparency within these institutions [9]. King highlights the significance of alliances and foreign intervention in stimulating military innovation, particularly in relation to economic and defense requirements [10]. Blanton and Kegley assert that globalization serves as the catalyst for military innovation. Authors argue that globalization fosters military innovation through competition and imitation [11]. However, Sloan argues that the real trigger for military innovation is the change in threat perception [12]. Contrarily, Malesic asserts that the catalyst for military innovation is broadening the obligations and roles of armies following the conclusion of the Cold War [13].

Farrell, Rynning, and Terriff, demonstrate that military innovation is stimulated by factors such as the operational requirements and the subsequent feedback received [14]. Russell's paper (2010) examines the impact of operational requirements on military innovation during the American military's operations in Iraq from 2005 to 2007 [15]. According to Avant, change will be

prompted by the attitude of military and civilian leaders, the disparity between military doctrine and civilian policy objectives, and institutional competition [16]. Alexander and Putnam highlight the significance of the influence of the private sector and foreign countries in stimulating innovation. They contend that engaging in military-to-military engagement through foreign military training can stimulate military innovation by presenting different thoughts and methods of military organization. Furthermore, it is asserted that academic institutions and individuals engaging with foreign nations will promote military innovation and lay the foundation for change. The primary catalysts for military innovation in this setting are the militaristic military, private sector, foreign countries, foreign military training programs, and university research [17]. According to John A. Lynn, military change can be prompted by factors such as military culture, institutional characteristics, evolving procedures, and the effects of technology, as well as economic and commercial progress. Within this framework, military innovation can be conceptualized as being triggered by several causes such as the army model, evolving fighting tactics, economic and commercial advancements, and changes in governance systems [18].

Consequently, there is a lack of agreement on the factors that initiate military innovation. Nevertheless, it is possible to establish a generic categorization despite the absence of agreement. Upon evaluating the data derived from the literature, the primary catalysts for military innovation can be identified as follows: a) civilian influence, b) evolving threat perception, c)

military and economic alliances, d) technological advancement, e) military culture, f) competition with opposing armies, and g) operational necessities. Below are the significance of the criteria in relation to military innovation and their impact.

Civilian intervention refers to the actions taken by the political leaders to enforce their judgments in the military domain within the framework of civil-military interactions [19]. The analysis of threat perception can be contextualized within global events while also being influenced by regional developments. During the modern period (1900-1945), the main concern was the possibility of enemy occupation. In the late modern period (1945-1990), the focus shifted to the fear of nuclear war. In the post-modern period (1990-...), the primary concerns include ethnic and religious conflicts, terrorism, and other related issues [20]. This scenario exemplifies the shift in the perception of danger. Today, we will address the concept of multidimensional threat perception, which is commonly analyzed within the framework of hybrid warfare. Sloan examines the initiation of innovation in the US military by analyzing its occurrence during the Gulf War, the September 11 attacks, and the counterterrorism operations in Iraq and Afghanistan. The primary inference is that the alteration in the perception of danger instigates the modification in the military [21]. Hence, the evolving threat assessments of nations must prompt military adaptations. Türkiye has a multifaceted threat perception because of its close proximity to conflict zones and the potential for both conventional and irregular wars.

The alliances encompass political and military international organizations such as NATO and the UN. Türkiye provides assistance to multiple military operations sanctioned by both NATO and the UN. Military and economic alliances are global organizations that facilitate the achievement of shared objectives and tasks. In this particular situation, the phenomenon of isomorphism among organization members becomes apparent. For instance, the United States has had a significant influence on the design of NATO, a military organization, and holds a prominent and impactful role inside the organization. To secure the organization's rules and effectiveness, it is believed that other members should undergo a transformation that aligns with the structure. The homogeneity of the personnel inside the organization is regarded as a catalyst for military innovation [22].

Technological innovation refers to developing and implementing novel or enhanced technologies, techniques, systems, and processes that lead to notable advancements or breakthroughs in different domains [23]. Marshall McLuhan posits that technological determinism is the dominant force behind societal and cultural transformation, asserting that technical advancements are the fundamental catalysts of change [24]. When assessing military innovation through the lens of technological determinism, it may be concluded that technological innovation is the primary catalyst for military advancement.

Rosen, however, assesses the influence of technological advancement on military innovation by integrating the aspects of combat, peacetime, and technology. According to his

perspective, not all technological advancements result in military advancements. One of the primary responsibilities of militaries is to protect the country and strategize and equip themselves for potential future conflicts. Hence, the new technology's ability to demonstrate its military might and become a potent asset in the race for weaponry is regarded as a catalyst for military innovation [25]. Furthermore, Latour contends that technological innovation will be embraced and result in innovation if it is implemented and supported by cohesive social networks [26].

Military culture refers to the process of establishing and maintaining a set of rules, routines, behaviors, norms, and doctrines inside a military structure. These patterns of conduct become permanent and ingrained within the organization [27]. Farrell contends that culture plays a significant role in initiating and driving military innovation. Farrell highlighted that the military's response to the endorsement of innovation is influenced by its military culture, with a particular focus on European, American, and East Asian nations. According to Farrell, culture can impact military innovation through three mechanisms. Firstly, experienced military leaders, also known as the Military Elite, can initiate innovation by reconfiguring the existing culture. Secondly, external shocks can alter the culture and consequently influence military innovation. Lastly, international professional military culture can facilitate cultural change and military innovation by allowing military organizations to mutually influence each other [28]. Elizabeth Kier, a scholar, has highlighted the significance of cultural influence in achieving military innovation [29].

Competition between rival armies refers to the efforts made by a military power to enhance its capabilities and develop dominance or asymmetry over other armed forces in order to defend the country. Some argue that engaging in competition with opposing armies serves as a catalyst for military changes. Given that the primary objective of armies is to safeguard the nation, they typically adopt strategies to assess the nature of upcoming conflicts and the means by which victory can be achieved. The perception of a threat arises from the potential for asymmetry resulting from any military innovation that could disrupt the success of established war strategies employed by armies. Some think that this impression of threat causes militaries to respond and maybe overreact to new foreign developments. From this standpoint, the notion that competition between different branches of the military might stimulate advancements in military technology becomes prominent [30].

Operational requirements refer to the essential components that armed forces require in order to carry out their operational duties effectively. The significance of requirements that arise during and following operational experiences in influencing military innovation is underscored. The factors that contribute to this phenomenon are the belief that armies may stimulate military advancement by receiving feedback and addressing significant shortcomings in military capabilities during operations (Russell, 2010, pp. 595-624). Theo Farrell and other scholars contend that the demands arising from different military operations stimulate military innovation, particularly in terms of policy [31]. Operational deficiencies necessitate the military to achieve its

purpose, which in turn has a beneficial impact on military innovation.

3. METHOD

The research employed the Fuzzy DEMATEL method. The questions were designed using a 5-point Likert-type scale to assess the relationship and ranking of elements that stimulate military innovation. To confirm the questions' validity and dependability, they were forwarded to three experts and modified based on their feedback. The final survey included 7 professionals, both civilian and military, who work and live in Türkiye. Three of the experts have military backgrounds and are also working in academia, so they are able to connect theory with practice. The other four experts are well-known scholars who specifically focus on security matters and the defense industry.

The DEMATEL is a technique that helps establish causal links among intricate real-world elements [32]. This method employs pairwise comparisons between criteria/ objectives during its procedure [33]. It relies on diagrams that leverage expert judgments to discern the components inside a system [34]. This approach involves the identification of groups that are impacted and groups that have an influence [35]. The DEMATEL method, in conjunction with fuzzy logic, is a methodology employed to address the issue of expert indecisiveness [36]. This approach involves the execution of the following procedures.:

a) Identification of Criteria and Determination of Fuzzy Scale (Linguistic Expression): Criteria are established by thoroughly examining existing literature and

consulting with experts in the field. Experts are required to compare these criteria. A digital form was generated to facilitate the process of comparing. The question in the form is: "To what extent does the criterion of civilian impact (AD1.) affect the criterion of changing threat perception (AD2.) in terms of military innovation?". Specialists evaluated the criteria by comparing them with language terms. This study utilized a trapezoidal fuzzy number set to represent linguistic phrases. Table 1 displays the linguistic scale employed in the study along with the accompanying fuzzy values.

Table 1: The fuzzy linguistic scale.

Linguistic terms	Linguistic values	$A^{\sim}$			
		A	b	C	d
Very Low Influence	VL	0	0	0.250	0.250
Low Influence	L	0	0	0.250	0.500
Mid Influence	M	0	0.250	0.500	0.750
High Influence	H	0.250	0.500	0.750	1.000
Strongly Influence	S	0.500	0.750	1.000	1.000

The fuzzy set is ($A^{\sim}$) and $\mu_A(x)$ is the fuzzy set member function. Unlike a crisp set where elements are either in the set or not (true/false, 0/1), a fuzzy set allows elements to have degrees of membership. The mathematical expression of this set is given in Equation 1. Figure 1 shows trapezoidal fuzzy numbers. In trapezoidal fuzzy numbers, a is the smallest value and d is the

largest value. The fuzzy set $A^{\sim}$ represented as a collection of ordered pairs $(x, \mu_A(x))$ where each pair shows an element x and its degree of membership $\mu_A(x)$.

$$A^{\sim} = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (1)$$

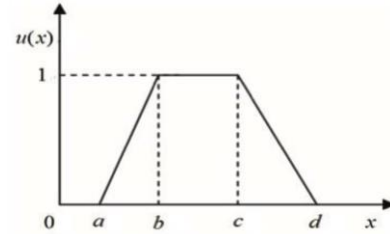


Figure 1: Trapezoidal fuzzy numbers [37].

The mathematical representation of $\mu_A(x)$ is shown in the following equation [38], Equation (2)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & -\infty < x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{(x-d)}{(c-d)}, & c < x \leq d \\ 0, & d \leq x < \infty \end{cases} \quad (2)$$

b) Construction of Fuzzy Direct Relationship

Matrices (X): The fuzzy pairs matrix illustrates the interrelationships between factors in a fuzzy manner. Experts are requested to compare the criteria among themselves. Experts answer these questions based on linguistic phrases. Afterward, fuzzy direct relationship matrices (X) are generated, where the numerical values match the linguistic statements (Equation 3).

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \dots & (f_{1n}^a; f_{1n}^b; f_{1n}^c; f_{1n}^d) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (f_{n1}^a; f_{n1}^b; f_{n1}^c; f_{n1}^d) & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

c) Creating Average Fuzzy Direct

Relationship Matrix: After creating the fuzzy direct relationship matrices of each expert, the average fuzzy direct relationship matrix is created by taking the arithmetic mean of the trapezoidal fuzzy numbers in these matrices.

d) Creating the Normalized Fuzzy Direct

Relationship Matrix ($E^{\sim}$): After creating the average fuzzy direct relationship matrix, this matrix needs to be normalized. For the normalized fuzzy direct relationship matrix, the following equations are used (Equation 4 and Equation 5):

$$E^{\sim} = \frac{c}{r_j} = \left(\frac{a_{ij}}{r_a}, \frac{b_{ij}}{r_b}, \frac{c_{ij}}{r_c}, \frac{d_{ij}}{r_d} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r_a &= \max_{1 \leq j \leq n} (\sum_{n=1}^G a_{ij}) \\ r_b &= \max_{1 \leq j \leq n} (\sum_{n=1}^G b_{ij}) \\ r_c &= \max_{1 \leq j \leq n} (\sum_{n=1}^G c_{ij}) \\ r_d &= \max_{1 \leq j \leq n} (\sum_{n=1}^G d_{ij}) \end{aligned} \quad (5)$$

$G = \text{Number of Experts}$

e) Creating the Fuzzy Total Relationship

Matrix (T): The fuzzy total relationship matrix is obtained by taking the limit of the created matrix [39]; Equation 6 and Equation 7).

$$\lim_{U \rightarrow \infty} E^{\sim} + E^{\sim 2} + E^{\sim 3} + \dots E^{\sim G} \quad (6)$$

$$T = E^{\sim} (I - E^{\sim})^{-1} \quad (7)$$

$I = \text{Unit Matrix}$

f) Clarification: Using the following equation, the Center of Area Method was applied to facilitate the analysis of the values [40]; Equation 8).

$$x_{ij}^* = \frac{(c_{ij}^2 + d_{ij}^2 + c_{ij}d_{ij}) - (a_{ij}^2 + b_{ij}^2 + a_{ij}b_{ij})}{3[(c_{ij} + d_{ij}) - (a_{ij} + b_{ij})]} \quad (8)$$

g) Identification of Affected and Influencing (Sender and Recipient) Groups:

The sum of the rows in the stabilized fuzzy total relationship matrix R_j represents the influence of other criteria and the sum of the columns C_j represents the influence of other criteria.

h) Determination of Criteria Weights: The weights of the criteria were calculated with the following equations [41]; Equation 9 and Equation 10).

$$W_i = \sqrt{(R_j + C_j)^2 + (R_j - C_j)^2} \quad (9)$$

$$w_j = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_i} \quad (10)$$

4. FINDINGS

In this research, 7 experts were asked to prioritize and compare the factors that trigger military innovation among themselves. In the selection of the experts, they were important that the specialized in military innovation. However, in order to ensure diversity, attention was paid to the fact that they have worked on different subjects [42].

As a result of the experts' evaluation, the linguistic expressions of the military innovation criteria are given below (Table 2).

Table 2: Linguistic assessments of experts.

Exp erts	Crit eria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Expert 1	C1	0	VL	S	H	OE	L	VL
	C2	H	0	S	S	M	S	S
	C3	S	H	0	M	M	S	VL
	C4	L	L	L	0	H	H	S
	C5	M	L	H	M	0	H	L
	C6	H	S	S	S	M	0	H
	C7	H	S	M	S	L	S	0
Expert 2	C1	0	M	M	H	M	M	H
	C2	M	0	S	H	H	H	H
	C3	M	H	0	H	H	H	H
	C4	H	M	M	0	H	H	H
	C5	M	M	M	H	0	M	H
	C6	M	H	H	S	H	0	H
	C7	H	H	S	S	H	H	0
Expert 3	C1	0	M	H	S	VL	M	L
	C2	M	0	S	S	L	H	S
	C3	S	S	0	L	M	H	L
	C4	L	S	M	0	H	S	S
	C5	VL	M	S	H	0	S	S
	C6	VL	S	S	S	H	0	S
	C7	L	H	H	S	H	H	0
Expert 4	C1	0	M	S	S	H	S	M
	C2	M	0	S	H	M	S	S
	C3	H	H	0	S	S	S	H
	C4	M	M	S	0	M	S	S
	C5	S	H	H	H	0	H	M
	C6	M	S	S	S	M	0	S
	C7	H	H	S	S	M	S	0
Expert 5	C1	0	L	M	H	L	M	VL
	C2	L	0	H	M	H	H	S
	C3	L	M	0	L	L	H	H
	C4	H	H	H	0	L	H	H
Expert 6	C1	0	H	S	M	S	M	H
	C2	M	0	H	L	M	H	H
	C3	L	M	0	H	M	L	M
	C4	H	H	H	0	M	L	H
	C5	L	L	VL	VL	0	L	L
	C6	L	VL	VL	M	L	0	L
	C7	L	L	M	VL	M	VL	0
Expert 7	C1	0	M	S	S	L	H	L
	C2	S	0	S	H	M	S	H
	C3	H	H	0	H	H	H	M
	C4	L	L	L	0	S	S	S
	C5	S	M	H	H	0	3	S
	C6	H	S	S	S	H	0	S
	C7	L	H	H	S	H	H	0

Averaging the mathematical representations of the expert assessments produces the following average fuzzy direct relationship matrix.

Table 3: Average of initial direct-relation fuzzy matrix.

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0.000	0.036	0.321	0.321	0.107	0.107	0.071
	0.000	0.214	0.571	0.571	0.250	0.321	0.179
	0.000	0.464	0.821	0.821	0.500	0.571	0.429
	0.000	0.679	0.929	0.964	0.679	0.786	0.607
C2	0.107	0.000	0.429	0.250	0.071	0.357	0.393
	0.321	0.000	0.679	0.464	0.286	0.607	0.643
	0.571	0.000	0.929	0.714	0.536	0.857	0.893
	0.786	0.000	1.000	0.893	0.786	1.000	1.000
C3	0.214	0.214	0.000	0.179	0.143	0.286	0.107
	0.393	0.464	0.000	0.357	0.357	0.500	0.286
	0.643	0.714	0.000	0.607	0.607	0.750	0.536
	0.821	0.929	0.000	0.821	0.821	0.929	0.750
C4	0.107	0.143	0.143	0.000	0.179	0.321	0.393
	0.250	0.321	0.321	0.000	0.393	0.536	0.643
	0.500	0.571	0.571	0.000	0.643	0.786	0.893
	0.750	0.786	0.786	0.000	0.857	0.929	1.000
C5	0.143	0.036	0.214	0.143	0.000	0.179	0.179
	0.286	0.214	0.429	0.357	0.000	0.393	0.357
	0.536	0.464	0.679	0.607	0.000	0.643	0.607
	0.679	0.714	0.857	0.821	0.000	0.857	0.786
C6	0.071	0.357	0.357	0.357	0.107	0.000	0.286
	0.214	0.571	0.571	0.607	0.321	0.000	0.500
	0.464	0.821	0.821	0.857	0.571	0.000	0.750
	0.679	0.893	0.893	0.929	0.821	0.000	0.893
C7	0.107	0.214	0.250	0.393	0.107	0.286	0.000
	0.250	0.393	0.500	0.607	0.286	0.500	0.000
	0.500	0.643	0.750	0.857	0.536	0.750	0.000
	0.750	0.857	0.929	0.893	0.786	0.893	0.000

Table 4: Normalized initial direct-relation fuzzy matrix.

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0.000	0.021	0.188	0.188	0.063	0.063	0.042
	0.000	0.070	0.186	0.186	0.081	0.105	0.058
	0.000	0.102	0.180	0.180	0.109	0.125	0.094
	0.000	0.124	0.170	0.176	0.124	0.144	0.111
C2	0.063	0.000	0,250	0.146	0.042	0.208	0.229
	0.105	0.000	0,221	0.151	0.093	0.198	0.209
	0.125	0.000	0,203	0.156	0.117	0.188	0.195
	0.144	0.000	0,183	0.163	0.144	0.183	0.183
C3	0.125	0.125	0.000	0.104	0.083	0.167	0.063
	0.128	0.151	0.000	0.116	0.116	0.163	0.093
	0.141	0.156	0.000	0.133	0.133	0.164	0.117
	0.150	0.170	0.000	0.150	0.150	0.170	0.137
C4	0.063	0.083	0.083	0.000	0.104	0.188	0.229
	0.081	0.105	0.105	0.000	0.128	0.174	0.209
	0.109	0.125	0.125	0.000	0.141	0.172	0.195
	0.137	0.144	0.144	0.000	0.157	0.170	0.183
C5	0.083	0.021	0.125	0.083	0.000	0.104	0.104
	0.093	0.070	0.140	0.116	0.000	0.128	0.116
	0.117	0.102	0.148	0.133	0.000	0.141	0.133
	0.124	0.131	0.157	0.150	0.000	0.157	0.144
C6	0.042	0.208	0.208	0.208	0.063	0.000	0.167
	0.070	0.186	0.186	0.198	0.105	0.000	0.163
	0.102	0.180	0.180	0.188	0.125	0.000	0.164
	0.124	0.163	0.163	0.170	0.150	0.000	0.163
C7	0.063	0.125	0.146	0.229	0.063	0.167	0.000
	0.081	0.128	0.163	0.198	0.093	0.163	0.000
	0.109	0.141	0.164	0.188	0.117	0.164	0.000
	0.137	0.157	0.170	0.163	0.144	0.163	0.000

In Table 5, the fuzzy total relationship matrix is constructed by taking the limit of the normalized fuzzy direct relationship matrix.

Table 5: Total-relation fuzzy matrix.

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0.156	0.242	0.466	0.468	0.213	0.364	0.323
	0.313	0.470	0.672	0.663	0.424	0.595	0.522
	0.649	0.835	1.030	1.017	0.784	0.964	0.899
	1.319	1.537	1.696	1.684	1.507	1.682	1.571
C2	0.319	0.394	0.747	0.668	0.296	0.704	0.681
	0.531	0.571	0.911	0.844	0.571	0.870	0.829
	0.905	0.912	1.248	1.196	0.944	1.205	1.161
	1.648	1.647	1.946	1.912	1.738	1.953	1.854
C3	0.296	0.384	0.391	0.479	0.258	0.515	0.410
	0.464	0.586	0.586	0.676	0.494	0.703	0.611
	0.816	0.928	0.940	1.042	0.848	1.052	0.974
	1.557	1.687	1.678	1.790	1.640	1.829	1.711
C4	0.265	0.392	0.513	0.443	0.299	0.584	0.592
	0.438	0.570	0.702	0.598	0.519	0.736	0.725
	0.807	0.924	1.073	0.948	0.872	1.081	1.056
	1.554	1.676	1.812	1.668	1.653	1.838	1.754
C5	0.222	0.233	0.404	0.373	0.142	0.378	0.355
	0.388	0.460	0.625	0.598	0.338	0.599	0.555
	0.743	0.823	0.993	0.968	0.673	0.962	0.916
	1.448	1.562	1.708	1.686	1.416	1.714	1.617
C6	0.292	0.550	0.694	0.691	0.305	0.514	0.624
	0.477	0.693	0.840	0.835	0.553	0.664	0.761
	0.855	1.027	1.186	1.176	0.917	1.006	1.100
	1.548	1.695	1.831	1.817	1.652	1.697	1.744
C7	0.279	0.441	0.584	0.652	0.279	0.596	0.427
	0.451	0.603	0.763	0.780	0.505	0.746	0.567
	0.820	0.951	1.119	1.122	0.868	1.092	0.907
	1.556	1.688	1.834	1.811	1.646	1.835	1.601

The total relationship matrix as a result of the regularization process is shown below (Table 6).

Table 6: Total-relation matrix.

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0.632	0.793	0.987	0.980	0.756	0.924	0.850
C2	0.876	0.908	1.238	1.180	0.913	1.211	1.157
C3	0.810	0.924	0.924	1.023	0.837	1.053	0.952
C4	0.793	0.918	1.051	0.941	0.863	1.088	1.058
C5	0.725	0.794	0.956	0.929	0.669	0.939	0.884
C6	0.816	1.015	1.160	1.152	0.880	0.995	1.080
C7	0.802	0.948	1.100	1.116	0.851	1.095	0.901

Table 7. Crisp values of r_i , c_j , $r_i + c_j$ and $r_i - c_j$, weights.

Criteria	R_i	C_i	R_i+C_i	R_i-C_i	W	Ranking
C1-Civilian intervention	5.922	5.454	11.376	0.468	0.122	7
C2-Threat perception	7.482	6.299	13.781	1.183	0.149	4
C3- Alliances	6.523	7.415	13.938	-0.892	0.150	3
C4-Technological innovations	6.711	7.321	14.032	-0.610	0.151	2
C5- Military culture	5.896	5.769	11.665	0.126	0.125	6
C6- Competition with rival militaries	7.097	7.305	14.403	-0.208	0.155	1
C7-Operational requirements	6.814	6.881	13.695	-0.068	0.147	5

Table 7 shows the sender and receiver groups obtained from the total relationship matrix, and the weights are determined.

The paramount factor for military innovation has been ascertained to be the presence of competition from opposing armies. The factors encompass technological innovation, military and economic alliances, evolving threat perception, operational necessities, military culture, and civilian impact. Upon analyzing the weights, it becomes evident that numerous

criteria possess equal weights. The data indicate that civilian influence and military culture have less significance in military innovation compared to other factors.

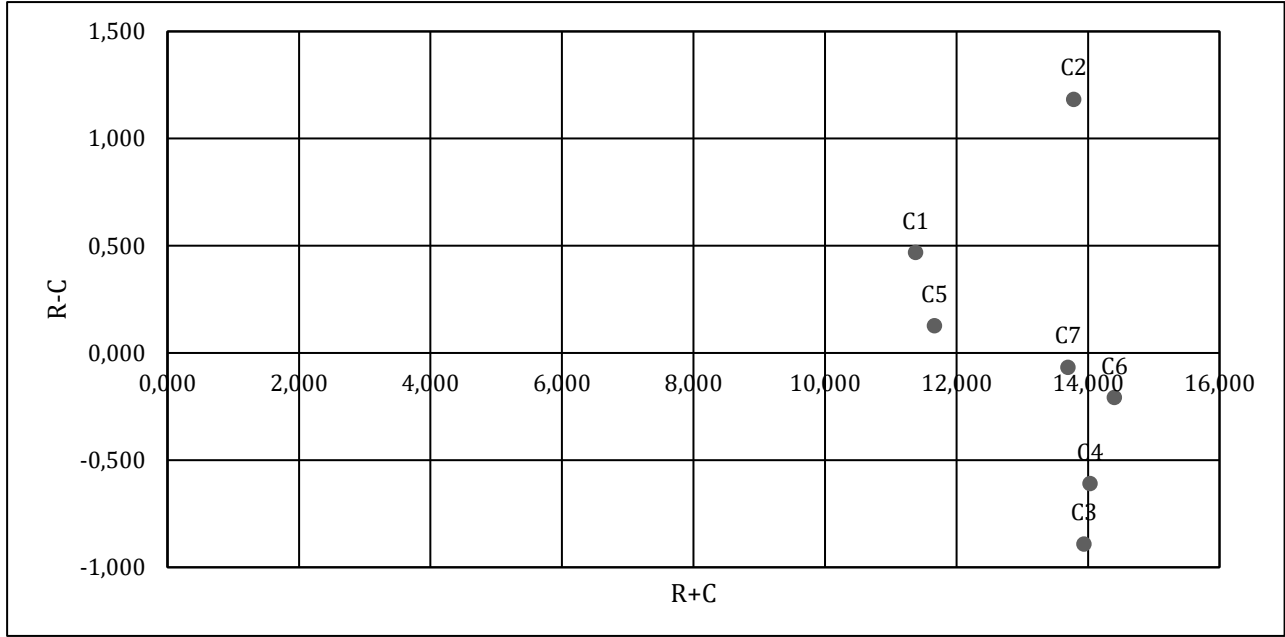


Figure 2: Cause and effect diagram.

The cause-and-effect diagram (Figure 2) shows that Threat Perception (C2), Civilian Influence (C1), and Military Culture (C5) impact Operational Necessity (C7), Competition with Rival Armies (C6), Technological Innovation (C4), and Military and economic alliances (C3).

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

While the study of military innovation has long been a continuous field of interest for Western scholars, it remains a relatively new area of research for Türkiye scholars. The existing literature in this field is limited and primarily focuses on evaluating and discussing the various factors that prompt military innovation. Western researchers have extensively examined the evolution of armies through case studies, as well as the evaluation of military doctrines and experiences of change. In contrast, researchers in Türkiye have encountered limitations in accessing diverse information on military matters. The conservative approach to military issues has led to a focus on the publicized

developments in the defense industry and the evaluation of well-known products in the literature. Therefore, the relatively older studies are constrained to discussions about embargoes and technological advancements.

Terriff and Farrell criticized the notion that the military would adapt in order to secure victory in war, underscoring the significance of cultural factors. Avant explains that the catalyst for change was the institutional flexibility inherent in military culture. She specifically notes that the British Army was able to achieve the objectives set by civilian authorities without resorting to coercion during the wars it engaged in. Kier analyzed the military cultures of France and Britain, focusing particularly on compulsory military service and the offensive and defensive doctrines of their armies. She identified culture as the underlying reason for the disparities between them. However, the cultural factor is a reality that is challenging to fully articulate in Türkiye, given the complexities of how military culture

influences military change due to the lack of research [45].

In discussions about military change, Posen's civilian influence element refers to civilian power intervening in the military sphere. This intervention may lead to crises, potentially slowing down or halting military change [46]. The conflict between civilians and military elites in Türkiye could have contributed to a negative perception of civilian influence in driving military innovation. However, this perspective contradicts Ateş's (2023) argument that cohesive social networks between civilians and the military have facilitated Turkish military innovation. This contradiction may stem from a lack of information. Additionally, public tensions in civil-military relations might have created a perception that civilian-military cooperation was not feasible in Türkiye [47].

In this study, the experts ranked the factors that drive military innovation for Türkiye in the following order: (Table 7) Competition with Rival Armies, Technological Innovation, Military and Economic Alliances, Changing Threat Perception, Operational Requirements, Military Culture and Civilian Influence. Despite limited previous research focusing on civil-military relations, the study results reveal that military culture and civilian influence are ranked lowest. This illustrates a notable difference between Western and Türkiye experiences.

According to the Influence Diagram (Figure 2) results, Changing Threat Perception (C2), Civilian Influence (C1) and Military Culture (C5) have emerged as the factors that affect the other elements the most, respectively. However, these factors are ranked lower among the factors that

trigger military innovation in Table 7. In this context, it is concluded that in the perceptions of Turkish experts, Changing Threat Perception (P2), Civilian Influence (P1) and Military Culture (P5) have an important role in mobilizing other elements, even if they do not directly trigger innovation.

Competition with Rival Armies (C6), which is the first factor that triggers military innovation, affects Military and Economic Alliances (C3), Technological Innovation (C4) and Changing Threat Perception (C2) the most, respectively. In other words, a change in Competition with Rival Armies (C6) affects C3, C4 and C2. A change in Technological Innovation (C4) primarily affects Competition with Rival Armies (C6), Operational Requirements (C7) and Military and Economic Alliances (C3). A change in Military and Economic Alliances (C3) affects Competition with Rival Armies (C6), Technological Innovation (C4) and Operational Requirements (C7).

Sloan highlights the shift in security perceptions following the terrorist incidents in the United States, arguing that such painful experiences inevitably prioritize change [48]. In contrast, despite enduring terrorist attacks for an extended period, Türkiye has experienced relatively slow military changes. Consequently, Turkish experts may feel that the evolving threat perception has not directly spurred military transformation. King identifies international alliances as a crucial driver of change. A notable example is Türkiye's modernization and military advancements, which significantly accelerated after its accession to NATO in 1952. This reality serves as a key factor

influencing the perspectives of experts in the field.

In conclusion, it is evident that the military innovations of countries are closely tied to their own unique experiences. Therefore, it is underscored that the factors influencing military innovation include the country's history, experiences, security perceptions, and civil-military relations. It is strongly contended that competition with rival armies, technological innovation, as well as military and economic alliances act as catalysts for innovation. In order to ascertain changes in the perceptions of Turkish experts regarding military innovation and to analyze the direction of change, it is imperative to conduct further research at different time intervals. The study is limited by the small number of experts working on the subject. To unveil different dimensions of Turkish military innovation, it is recommended that future research utilizes different and larger sample sizes.

ACKNOWLEDGMENTS

“This research has received no external funding”

We would like to express our gratitude to Assis. Prof. Dr. Barış ATEŞ for his invaluable contribution to the conduct of this study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Selçuk CANTÜRK: Conceptual Design, Literature review, Analysis Evaluation, Writing.

Fahri Alp ERDOĞAN: Methodology, Data Analytics.

Murat SAĞBAŞ: Methodology, Data Analytics.

COMPETING INTERESTS

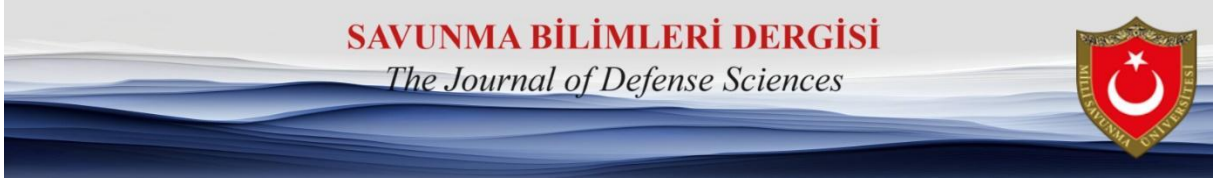
The author(s) has/have no competing interests to declare.

REFERENCES

- [1] Sinterniklaas, R. (2018). *Military Innovation: Cutting the Gordian Knot*, Research Paper:116, Breda: Publications Faculty of Military Sciences Netherlands Defence Academy.
- [2] Mevlütoglu, A. (2017) “Commentary on Assessing the Turkish Defense Industry: Structural Issues and Major Challenges”, *Defense Studies*, 17:3, pp. 282–294. DOI: <https://doi.org/10.1080/14702436.2017.1349534>
- [3] Egeli, S., Güvenç, S., Kurç, Ç. and Mevlütoglu, A. (2024), *From Client to Competitor: The Rise of Türkiye’s Defence Industry*, Raport. The International Institute for Strategic Studies ,1-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.15922.00962>.
- [4] Kurç, Ç. & Neuman, S. G. (2017). *Defence industries in the 21st century: a comparative analysis*, *Defence Studies*. vol. 17, no.3: 219-227. DOI: <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/14702436.2017.1350105>.
- [5] Ateş, B. (ed.). (2023). *Military Innovation in Türkiye: An Overview of the Post-cold War Era (1st ed.)*. London: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003327127>.
- [6] Posen, B. R. (1984). *The Sources of Military Doctrine: France, Britain and Germany between the World Wars*. New York: Cornell University Press.
- [7] Terriff, T., & Farrell, T. (2002). *Military Change in the New Millennium*. T. Farrell, T. Terriff (ed.). *The Sources of Military Change: Culture, Politics, Technology*. (pp. 265-277). Londra: Lynne Rienner Publishers.
- [8] Marten-Zisk, K. (1993). *Engaging the Enemy: Organization Theory and Soviet Military Innovation, 1955–1991*. Princeton: Princeton University Press. DOI: <https://doi.org/10.2307/j.ctt7rjc7>.
- [9] Avant, D. D. (1994). *Political Institutions and Military Change: Lessons from Peripheral Wars*. New York: Cornell University Press.

- [10] King, A. (2011). *The Transformation of Europe's Armed Forces: From the Rhine to Afghanistan*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778469>.
- [11] Blanton, S. L. & Kegley, C. W. (2017). *World Politics: Trend and Transformation, 2016–2017 Edition*. Boston: Cengage Learning.
- [12] Sloan, E. (2008). *Military Transformation and Modern Warfare A Reference Handbook*. Westport: Praeger Security International.
- [13] Malesic, M. (2005). Introduction: The Challenge of Defence Transformation in Europe, T. Edmunds & M. Malesic (ed.). *Defence Transformation in Europe: Evolving Military Roles*. Amsterdam: IOS Press.
- [14] Farrell, T., Rynning, S. & Terriff, T. (2013). *Transforming Military Power Since the Cold War: Britain, France, and the United States, 1991–2012*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107360143>.
- [15] Russell, J. A. (2010). Innovation in War: Counterinsurgency Operations in Anbar and Ninewa Provinces, Iraq, 2005–2007. *Journal of Strategic Studies*, 33 (4): 595–624. DOI: <https://doi.org/10.1080/01402390.2010.489715>.
- [16] Avant, D. D. (1994). *Political Institutions and Military Change: Lessons from Peripheral Wars*. New York: Cornell University Press.
- [17] Golts, A. M. & Putnam, T. L. (2004). State Militarism and Its Legacies: Why Military Reform Has Failed in Russia, *International Security*. The MIT Press. 29 (2): 121-158. DOI: <https://doi.org/10.1162/0162288042879968>.
- [18] Lynn, J. A. (1996). The Evolution of Army Style in the Modern West, 800–2000. *The International History Review*, 18(3): 505-545. DOI: <https://doi.org/10.1080/07075332.1996.964075>.
- [19] Posen, B. R. (1984). *The Sources of Military Doctrine: France, Britain and Germany between the World Wars*. New York: Cornell University Press.
- [20] Moskos, C., Williams, J.A., Segal, D.R. (2000). *The Postmodern Military: Armed Forces after the Cold War*. Moskoc, C., Toward Postmodern Military: The United State (pp.14-27). Oxford: Oxford University Press.
- [21] Sloan, E. (2008). *Military Transformation and Modern Warfare A Reference Handbook*. Westport: Praeger Security International.
- [22] Terriff, T., & Farrell, T. (2002). Military Change in the New Millennium. T. Farrell, T. Terriff (ed.). *The Sources of Military Change: Culture, Politics, Technology*. (pp. 265-277). Londra: Lynne Rienner Publishers.
- [23] Jain, N. (2023). “What is Technology Innovation? Definition, Examples and Strategic Management”: IDEASCALE. <https://ideascale.com/blog/what-is-technology-innovation/>.
- [24] McLuhan, M. (1962). *The Gutenberg Galaxy: The making of Typographic Man*. Toronto: University of Toronto Press.
- [25] Rosen, S. P. (1991). *Winning the Next War: Innovation and the Modern Military*. New York: Cornell University Press.
- [26] Latour, B. (1987). *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers Through Society*. Cambridge: Harvard University Press.
- [27] Terriff, T., & Farrell, T. (2002). Military Change in the New Millennium. T. Farrell, T. Terriff (ed.). *The Sources of Military Change: Culture, Politics, Technology*. (pp. 265-277). Londra: Lynne Rienner Publishers.
- [28] Grissom, A. (2006). The Future of Military Innovation Studies. *Journal of Strategic Studies*, 29 (5): 905-934. DOI: <https://doi.org/10.1080/01402390600901067>.
- [29] Kier, E. (1995). Culture and Military Doctrine: France between the Wars. *International Security*. 19 (4), 65-93. DOI: <https://doi.org/10.2307/2539120>.
- [30] Marten-Zisk, K. (1993). *Engaging the Enemy: Organization Theory and Soviet Military Innovation, 1955–1991*. Princeton: Princeton University Press. DOI: <https://doi.org/10.2307/j.ctt7rjc7>.
- [31] Russell, J. A. (2010). Innovation in War: Counterinsurgency Operations in Anbar and Ninewa Provinces, Iraq, 2005–2007. *Journal of Strategic Studies*, 33 (4): 595–624. DOI: <https://doi.org/10.1080/01402390.2010.489715>.
- [32] Seker, S., & Zavadskas, E. K. (2017). Application of fuzzy DEMATEL method for analyzing occupational risks on construction sites. *Sustainability*, 9(11): 2083. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112083>.

- [33] Jassbi, J., Mohamadnejad, F., & Nasrollahzadeh, H. (2011). A Fuzzy DEMATEL framework for modeling cause and effect relationships of strategy map. *Expert systems with Applications*, 38(5), 5967-5973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.026>.
- [34] Hosseini, S. M., Paydar, M. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2021). Recovery solutions for ecotourism centers during the Covid-19 pandemic: Utilizing Fuzzy DEMATEL and Fuzzy VIKOR methods. *Expert Systems with Applications*, 185, 115594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115594>.
- [35] Chang, B., Chang, C. W., & Wu, C. H. (2011). Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria. *Expert systems with Applications*, 38(3): 1850-1858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.114>.
- [36] Zhou, Q., Huang, W., & Zhang, Y. (2011). Identifying critical success factors in emergency management using a fuzzy DEMATEL method. *Safety science*, 49(2), 243-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.08.005>.
- [37] Saraswathi, A. (2019, June). A fuzzy-trapezoidal DEMATEL approach method for solving decision making problems under uncertainty. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2112, No. 1, p. 020076). AIP Publishing LLC. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5112261>.
- [38] Kumar, A., & Kaur, M. (2010). An algorithm for solving fuzzy maximal flow problems using generalized trapezoidal fuzzy numbers. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 8(2): 109-118. DOI: <http://dx.doi.org/10.3233/HIS-2011-0127>.
- [39] Seker, S., & Zavadskas, E. K. (2017). Application of fuzzy DEMATEL method for analyzing occupational risks on construction sites. *Sustainability*, 9(11): 2083. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112083>.
- [40] Eroğlu, Ö. & Gencer, C. (2021). Lojistik Destek Üssü Yer Seçiminde Kriter Ağırlıklarının Bulanık DEMATEL Yöntemi ile Değerlendirilmesi. M. Kabak, B. Erdebili ve (Ed.), *Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: Ms Excell ve Software Çözümlü Uygulamalar içinde* (s. 66-85). Nobel Yayınevi.
- [41] Saaty, T. L., & Özdemir, M. S. (2014). How many judges should there be in a group? *Annals of Data Science*, 1, 359-368.
- [42] Pribićević, I., Doljanica, S., Momčilović, O., Das, D. K., Pamučar, D., & Stević, Ž. (2020). Novel extension of DEMATEL method by trapezoidal fuzzy numbers and D numbers for management of decision-making processes. *Mathematics*, 8(5): 812. DOI: <https://doi.org/10.3390/math8050812>.
- [43] Terriff, T., & Farrell, T. (2002). Military Change in the New Millennium. T. Farrell, T. Terriff (ed.). *The Sources of Military Change: Culture, Politics, Technology*. (pp. 265-277). Londra: Lynne Rienner Publishers.
- [44] Avant, D. D. (1994). *Political Institutions and Military Change: Lessons from Peripheral Wars*. New York: Cornell University Press.
- [45] Kier, E. (1995). Culture and Military Doctrine: France between the Wars. *International Security*, 19 (4), 65-93. DOI: <https://doi.org/10.2307/2539120>.
- [46] Posen, B. R. (1984). *The Sources of Military Doctrine: France, Britain and Germany between the World Wars*. New York: Cornell University Press.
- [47] Ateş, B. (ed.). (2023). *Military Innovation in Türkiye: An Overview of the Post-cold War Era (1st ed.)*. London: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003327127>.
- [48] Sloan, E. (2008). *Military Transformation and Modern Warfare A Reference Handbook*. Westport: Praeger Security International.



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd>

5.8 GHz’de Havacılık Uygulamaları için Radomlu Konformal Mikroşerit Yama Anten Dizisi Tasarımı

Design of Radome-Enclosed Conformal Microstrip Patch Antenna Array for Aerospace Applications at 5.8 GHz

Burak Can KİŞLA ^{1*} Bilge ŞENEL ¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18.11.2024
Düzeltilme: 05.12.2024
Kabul: 16.01.2025

Keywords

Microstrip Patch Antenna
Radome
Conformal Antenna
Radome-antenna interaction

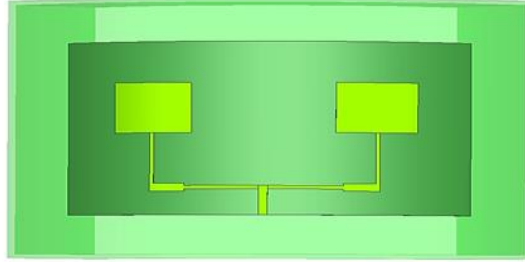
Anahtar Kelimeler

Mikroşerit Yama Anten
Radom
Konformal Anten
Radom-anten etkileşimi

Önemli Noktalar

Radom tasarımı ve konformal anten tasarımı örnek barından bu çalışma, havacılık uygulamalarında kullanılması için bir anten tasarımı sunmayı hedeflemiştir. Bu çalışmada sunulan, radom ve anten birbirine entegre edilerek etkileşim analizi yapılmıştır. Etkileşim analizi sonucunda, optimizasyonu sağlanarak yapı literatürdeki örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Akademik ve sektörel olarak, radom ve anten tasarımcıları için yeni bir araştırma kaynağı ve tasarım sunulması amaçlanmıştır.

Grafiksel Özet



Özet

Bu çalışmada, C bandında bir konformal anten ve radom tasarımı gerçekleştirilmiştir. C bandı içerisinde yer alan 5.8 GHz frekansı, uydur haberleşmesi ve nano aviyonik platformlarda kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamalarda kullanılan antenlerin yüzeye uygun, konformal şekilde ve muhafazalı olması önemlidir. Antenler hava araçlarına entegre edilebilir ve aynı zamanda radom korumalı olmalıdır. Tasarlanan anten ve radom önemli bulgular içermektedir. Radom tasarımında çok katmanlı yansımaya yönelik analitik formüller sağlanmıştır. Radom-anten etkileşimi detaylı olarak açıklanmış ve radomun, anten parametrelerine olan etkilerine yer verilmiştir. Çalışmada metodolojik bir karşılaştırma sunabilmek için, öncelikle radom tasarımı ve parametreleri daha sonra, 2x1 düzlemsel mikroşerit yama anten tasarımı, sonrasında 2x1 konformal anten tasarımı en son olarak da radomlu konformal antenin tasarımı ve performans analizleri karşılaştırması verilmiştir. Çalışmada önerilen tek katman radomun iletim katsayısı, 0.21 dB’dir. Düzlemsel 2x1 mikroşerit yama antenin yönlülüğü 10.5 dBi, kazancı 8.1 dBi ve S_{11} ’i ise -34.64 dB olarak bulunmuştur. Konformal yapıya geçildiğinde, bu parametreler yönlülük için 8.99 dBi, kazanç için 6.56 dBi, S_{11} için ise -15.22 dB olarak simüle edilmiştir. Nihai tasarım olarak konformal antenin yönlülüğü 8.77 dBi, kazancı 6.5 dBi ve S_{11} ’i -10.152 dB’dir. Nihai tasarım olarak sunulan radomlu konformal antenin, havacılık ve uzay çalışmaları için literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Abstract

In this study, a conformal antenna and radome design in the C-band were developed. The 5.8 GHz frequency within the C-band is utilized in satellite communications and nano-avionics platforms. It is essential for antennas used in such applications to be conformal to the surface and protected by a radome. These antennas should be integrable with aerial vehicles and shielded by a radome. The designed antenna and radome present significant findings. Analytical formulas for multilayer reflections have been provided for the radome design. The interaction between the radome and the antenna is explained in detail, and the effects of the radome on antenna parameters are discussed. To present a methodological comparison in the study, the radome design and its parameters are addressed first, followed by the design of a 2x1 planar microstrip patch antenna, the design of a 2x1 conformal antenna, and finally, the design and performance analysis of the conformal antenna with a radome. The transmission coefficient of the proposed radome is 0.21 dB. The directivity, gain, and S_{11} value of the 2x1 planar antenna are found to be 10.5 dBi, 8.1 dBi, and -34.64 dB, respectively. When transitioned to the conformal structure, these parameters are simulated as 8.99 dBi for directivity, 6.56 dBi for gain, and -15.22 dB for S_{11} . The directivity, gain, and S_{11} value of the conformal antenna with a radome are 8.77 dBi, 6.5 dBi, and -10.152 dB, respectively. The final design of the conformal antenna with a radome is anticipated to contribute to the literature in the fields of aviation and space studies.

*Corresponding author, e-mail: yl2230171011@ogr.sdu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konformal antenler, geleneksel dikdörtgen şeklindeki antenlerin yerine, platformun geometrisine uyum sağlayabilen, yüzeylere mükemmel bir şekilde entegre edilebilen tasarımları ifade eder [1]. Elektromanyetik dalgaların iletimi ve alımı sırasında, antenlerin üzerini kaplayan radomlar, çevresel koşullardan ve düşman tehditlerinden kaynaklanan zararları engellemek için kullanılır [2]. Radomlu konformal antenler, her iki bileşeni bir araya getirerek hem elektromanyetik performansı optimize etmeye hem de mekanik dayanıklılığı artırmaya yönelik bir çözüm sunar.

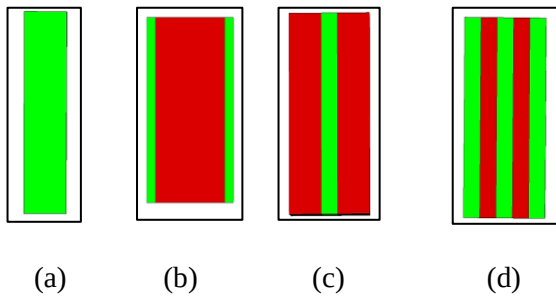
Konformal anten tasarımı, birçok teknik zorluğu içinde barındırır ve bu nedenle bir dizi disiplinin birleşimini gerektirir. Elektromanyetik teoriden malzeme bilimine, elektromanyetik dalgalarının yayılmasından mekanik mukavemete kadar birçok alanı içerir. Bu tasarımlar, radar, iletişim ve elektronik harp sistemlerinin güvenilirliği ve performansı için kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda, sivil havacılık ve uzay sektörleri için de önemli olan hava platformlarında ve uydu sistemlerinde kullanılır. Konformal antenlerin radomlarla bir araya getirilmesi, zorlu bir denge gerektirir. Bu denge, elektromanyetik performansın korunması, radomun mekanik dayanıklılığının sağlanması ve platformun aerodinamik özelliklerinin etkilenmemesi arasında kurulmalıdır. Bu nedenle, radomlu konformal anten tasarımı, mühendislerin yaratıcılığını, analitik yeteneklerini ve malzeme bilgisini en üst düzeye çıkarmalarını gerektirir [3,4].

Radomlu konformal antenlerin uygulama alanları oldukça geniştir. Savunma endüstrisinde, bu antenler savaş uçakları, denizaltılar ve askeri araçlar gibi platformlarda radar sistemleri için ideal bir seçenek olabilir. Uzay araştırmalarında, sivil havacılıkta ve ticari iletişim sistemlerinde de bu antenlerin uygulamaları bulunmaktadır. Tasarım ve uygulama süreçleri, elektromanyetik benzetimler, malzeme mühendisliği ve aerodinamik analiz gibi disiplinler arası çalışmaları içerir. Bu alan, sürekli olarak gelişen teknolojik ihtiyaçlara uygun olarak araştırmacılar ve mühendisler tarafından aktif bir şekilde keşfedilmektedir [5,6].

Havacılık ve uzay sistemlerinde, telemetrinin L-bandı ve S bandı frekans aralıklarından C bandına doğru ilerlediği bilinmektedir. C bandına bu geçişin nedeninin iki yönlü olduğu yaygın olarak anlaşılmaktadır. Birincisi, L ve S frekans bantları, farklı pazarlar tarafından çeşitli nedenlerle yeniden tahsis yoluyla büyük ölçüde azaltılmıştır ve ikincisi, çoğu uygulama için gereken bant genişliği katlanarak büyümüştür. Bu sadece askeri uygulamalarda değil, sivil havacılık platformlarında da tercihi söz konusudur. C Bant bölgesine geçişte özellikle konformal yapılar ön plandadır [7].

Elektromanyetik performansın optimize edilmesi ve mekanik dayanıklılığın artırılması, gelecekteki konformal anten tasarımlarının başarısı için kritik önem taşımaktadır ve bu alandaki çalışmaların önemini vurgulamaktadır [8]. Sonuç olarak, konformal antenler, radomlar ve radomlu konformal anten tasarımı, modern iletişim ve savunma sistemlerinin temel taşlarından biri olmaya devam etmektedir. Bu makale, konunun karmaşıklığını ve stratejik önemini anlamak

isteyen mühendisler, araştırmacılar ve savunma endüstrisinde olanlar için bir başlangıç noktası sunmayı amaçlamaktadır. Tek katman radomlar, tek bir katmandan oluşur ve bu katman, antenlerin veya iletişim ekipmanının elektromanyetik koruma ihtiyaçlarını karşılar. Bu basit tasarım, kompakt olmayan anten tasarımları için uygundur. Fakat radom tasarımı disiplinler arası bir süreç olduğu için, uygulama alanına göre radom türü değişkenlik gösterebilir. Tek katman radomlar, elektromanyetik geçirgenlik ve mekanik dayanıklılık açısından daha sınırlı bir kapasiteye sahiptir ve daha hafif yapılardır [9-11]. A-sandviç radomlar, iki farklı malzeme katmanının bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılardır. İç katmanda elektromanyetik geçirgenlik için dıştakilere göre düşük dielektrik katsayılı malzeme tercih edilir, dış katmanlar mekanik dayanıklılığı artırmak ve radomun aerodinamik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. [12]. B-sandviç radomlarda ise A-Sandviç yapıya kıyasla iç kısımdaki malzemenin dielektrik katsayısı daha büyüktür [13]. C-sandviç radomlar, A-sandviç ve B-sandviç radomların birleşimi olarak düşünülebilir. Bu tasarım, karmaşık ve çok yönlü uygulamalar için uygundur. [14]. Şekil 1’de şu ana kadar bahsedilen farklı radom yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1: (a) Tek katman radom yapısı (b) A-Sandviç radom yapısı (c) B-Sandviç radom yapısı (d) C-Sandviç radom yapısı.

Denklem 1-7’de ise, her biri kendi kalınlığı ve elektriksel özelliklere sahip N katman, iki ortam arasında yerleştirilecek olan radomlar için yansıma ve empedans eşitlikleri verilmiştir. Denklemlerde, Γ yansıma katsayısını, Z_0 boş uzayın öz empedansını, Z_m ortamın öz empedansını ifade eder. Düzlem dalga için boş uzayın öz empedansı 377Ω olarak ifade edilir. Burada E_θ , E_ϕ ve H_θ , H_ϕ elektrik ve manyetik alan vektörlerinin bileşenlerini, ϵ_0 ve μ_0 sırasıyla, boş uzayın elektrik ve manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Denklemden malzeme kalınlığı d_1 ve d_2 ile gösterilmiştir. n değeri katmanlar için öz empedansı genel olarak ifade eder. Beta (β) terimi alt indisi iki katmana göre faz sabitini temsil eder. N tane yüzey ve katman için denklem tekrarlanarak, hesap lineer formda sağlanır. Burada N temsili olarak verilmiştir. Bu senaryo, özellikle elektromanyetik dalgaların malzemeler veya yapılarla etkileşimini incelediği elektromanyetik analizde yaygın olarak kullanılır. Elektromanyetik dalga, farklı özelliklere sahip katmanlara çarptığında, dalganın bir kısmı geri yansır, bir kısmı katmanlardan geçer ve bir kısmı emilebilir veya zayıflayabilir. Yansıma (Γ) ve iletim katsayıları (T), gelen elektromanyetik dalganın, katmanlar ve sonsuz ortamlar arasındaki sınırlarda ne kadarının yansıdığını ve iletildiğini sayısal olarak göstermek için kullanılır. Bu katsayılar, her bir katmanın kalınlığı ve elektriksel özellikleri (örneğin, dielektrik sabiti (ϵ_r) ve manyetik geçirgenlik (μ_r)) gibi faktörlere bağlıdır [15].

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \frac{E_\phi}{H_\theta} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (2)$$

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu_m}{\epsilon_m}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (3)$$

$$\Gamma_0 = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \quad (4)$$

$$\Gamma_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (5)$$

...

$$\Gamma_N = \frac{n_L - n_N}{n_L + n_N} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Gamma &\cong \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-j2\beta_1 d_1} \\ &\quad + \Gamma_2 e^{-j2(\beta_1 d_1 + \beta_2 d_2)} \\ &\quad + \dots \\ &\quad + \Gamma_N e^{-j2(\beta_1 d_1 + \beta_2 d_2 + \dots + \beta_N d_N)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Gamma_N = \frac{\tilde{\Gamma}_N - \Gamma_{N-1} e^{-2jk_{n-1} t_{n-1}}}{1 + \tilde{\Gamma}_N \Gamma_{N-1} e^{-2jk_{n-1} t_{n-1}}}$$

Kompozit malzemeler genellikle cam elyaf ve diğer takviye malzemelerini içerir. Böyle tasarımlar, radomun hafif, dayanıklı ve elektromanyetik olarak şeffaf olmasını sağlar, böylece elektromanyetik dalgalar kolayca geçebilir.

Reçine, takviye malzemesini bir arada tutar, mekanik özellikleri artırır ve genel yapıyı güçlendirir [16]. Bu bağlamda, radomların yapısında reçineler önemli bir rol oynar. Reçineler aynı zamanda, radomun dayanıklılığını, çevresel koşullara karşı direncini ve elektromanyetik özelliklerini etkiler [16].

Çalışmada şu metodolojik sıra takip edilmiştir. Öncelikle merkez frekansı (f_c) seçilmiştir. C-

bandı telemetri uygulamalarında kullanılmak üzere 5.8GHz frekansı tercih edilmiştir. Daha sonra tasarım-üretim kolaylığı ve maliyet etkin olması gibi avantajlarından dolayı E-Cam Elyaf/Epoksi kullanılarak tek katman radom tasarımı yapılmıştır. Sonrasında anten tasarımına geçilmiştir. Konformal anten tasarımı öncesinde konformal antene referans teşkil etmesi adına düzlemsel anten tasarımı yapılmıştır. 2x1 mikroşerit dizi düzlemsel anten tasarımı baz alınarak konformal anten tasarımına geçilmiştir. Bu kısımda düzlemsel anten birebir boyutlarda konformal anten tasarımına aktarıldığında, elde edilen anten performansının isterleri sağlamadığı görülmüş ve yama boyutlarında optimizasyona gidilmiştir. Son olarak boyutları optimize edilen konformal anten, tek katman radoma entegre edilerek tek katman radomlu konformal antenin yönlülük, kazanç, yansıma katsayısı (S_{11}) ve Bant Genişliği (BG) performansı incelenmiş ve tasarımlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

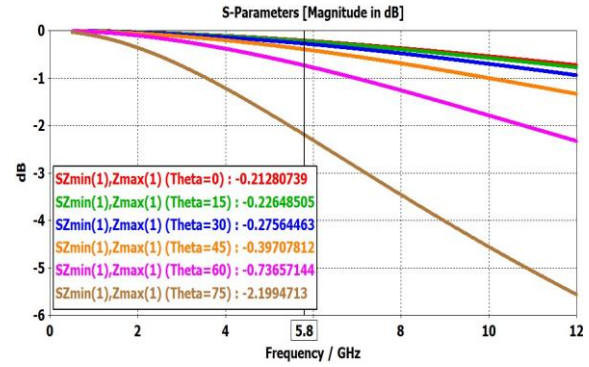
Çalışmanın ikinci bölümünde tek katman radom tasarımı, üçüncü bölümünde konformal ve düzlemsel anten tasarımları, benzetim sonuçları ve karşılaştırmaları, dördüncü bölümde radomlu konformal anten tasarımı ve benzetim sonuçları anlatılmıştır. Çalışmanın beşinci bölümünde düzlemsel anten, konformal anten ve radomlu konformal anten yapıları kendi aralarında karşılaştırılmış aynı zamanda elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalar ile de karşılaştırılarak çalışmada elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Çalışmanın V. Bölümü olan Sonuç bölümü ile makale sonuçlandırılmıştır.

2. RADOM TASARIMI (RADOM DESIGN)

Bu makaledeki tasarlanan konformal anten ile entegre kullanmak üzere, tasarım-üretim kolaylığı, düşük maliyetli olması gibi sebeplerden dolayı tek katman radom tasarlanmıştır. Anten çalışma frekansı 5.8 GHz seçildiği için anten bu frekans için tasarlanmıştır. Tasarım, CST Microwave Studio ortamında yapılmıştır. Frekans düzleminde, z-yönünde oluşturulan iki port ile birim hücre analizi sağlanmıştır.

Malzeme olarak, 1mm kalınlıklı E-Cam Elyaf/Epoksi ($\epsilon_r = 4.4$, $\tan\delta = 0.016$) tercih edilmiştir. Üretim ve elektromanyetik geçirgenlik açısından tek katman radom kalınlığı 1mm tercih edilmiştir. Elektromanyetik dalgaların bir ortamdan diğerine geçişindeki önemli bir faktör, iletim katsayısıdır. İletim katsayısı, elektromanyetik dalgaların bir yüzeye çarptığında ne kadarının iletildiğini gösterir. Ancak, bu katsayı, dalga demetinin yüzeye düşme açısına, yani geliş açısına bağlı olarak değişir. Genelde, elektromanyetik dalgaların yüzeye dik gelmesi durumunda iletim katsayısı maksimum değere ulaşır. Ancak, geliş açısı arttıkça iletim katsayısı genellikle azalır [17]. Bu durum, dalga demetinin yüzeye olan etkileşiminin geliş açısıyla birlikte değişmesinden kaynaklanır. Dalganın geliş açısı, elektromanyetik dalgaların bir yüzeye veya ara yüze nasıl çarptığını ifade eder ve dalga ile yüzey arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu açı, gelen dalganın yüzeye nasıl yansıdığını veya kırıldığını belirlemede önemlidir. Dalganın ve yüzeye dik çizgi olan yüzey normalinin oluşturduğu açıyı ölçer. Bu açı, dalga enerjisinin bir yüzeye çarpması üzerine yansımaları veya kırılmasını

tanımlarken Snell yasası gibi fiziksel yasaların uygulanmasında esastır. Şekil 2’de geliş açısına göre iletim katsayısı değişimi verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre tasarlanan radom yüzey ile 90° ’lik geliş açısı değerinde ($\theta=0^\circ$) (-0.21) dB’lik iletim katsayısına sahiptir.



Şekil 2: Tek katman radom için elektromanyetik dalganın geliş açısına göre iletim katsayısı değişimi.

Elektromanyetik dalgaların radomlarla etkileşimi, radom tasarımında ele alınan temel konular arasında yer alır. Bu konuların başında radom malzemesi seçimi gelir. Radom malzemesi, elektromanyetik dalgaların yansıtılması ve iletilmesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Doğru malzeme seçimi, radomun performansını etkileyen birinci faktördür [18].

Radomun geometrisi, elektromanyetik dalgaların yüzeyi nasıl etkileşime gireceğini belirler. Doğru bir şekil seçimi, radomun etkinliğini ve sistem performansını artırabilir. Ayrıca, radomun kalınlığı ve yapısal özellikleri de elektromanyetik özellikleri etkileyen kritik faktörlerdir. Düzgün bir tasarım, elektromanyetik dalgaların radom içinden geçişini optimize eder ve sistemin elektromanyetik uyumluluğunu artırır [19].

Radomların elektromanyetik özellikleri genellikle frekansa bağlı olarak değişir. Bu

nedenle, tasarım aşamasında radomun kullanılacağı frekans aralığı dikkate alınmalı ve radom malzemeleri ile geometrisi bu frekanslara uygun olarak seçilmelidir. Frekans bağımlılığı, radomun uzun vadeli performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu çalışmada tek katman radomun iletim performansının sandviç yapıya göre daha iyi oluşu, üretilebilirlik ve maliyet etkin olması gibi sebeplerden dolayı tek katman radom yapısı tercih edilmiştir ve bundan sonraki bölümde radom-anten etkileşimi ve karşılaştırması tek katman radom üzerinden sunulmuştur.

3. KONFORMAL ANTEN TASARIMI (CONFORMAL ANTENNA DESIGN)

Konformal antenler, günümüzde birçok farklı uygulama alanında önemli bir role sahip olan yenilikçi anten tasarımı yöntemlerinden biridir. Geleneksel antenlerin sınırlamalarını aşan konformal antenler, özellikle taşıyıcı platformun yüzeyine uyum sağlama yeteneği ile dikkat çekmektedir. Bu özellik, özellikle askeri uygulamalarda, hava, deniz ve kara araçlarında, düşük profilli ve aerodinamik olarak optimize edilmiş anten çözümleri sağlama potansiyeli sunmaktadır [20].

Konformal antenlerin en belirgin avantajlarından biri, düzensiz yüzeylere uyarlanabilir olmalarıdır. Bu özellik, uçak, gemi, araç gibi taşıyıcı platformların şekline uyum sağlama yeteneği anlamına gelir. Konformal antenler, aerodinamik etki nedeniyle askeri uygulamalarda sıkça tercih edilir. Ayrıca, tıbbi görüntüleme cihazları, uzaktan algılama sistemleri ve spor ekipmanları gibi alanlarda da kullanılmaktadırlar.

Konformal anten tasarımında karşılaşılan başlıca zorluk, düzlemsel formda tasarlanan anten yapısından platform yüzeyine uyumlu konformal yapıya geçişte meydana gelebilen performans düşüşüdür [21]. Bu durumun üstesinden, taşıyıcı yüzeye uyumlu hale getirilen antenin boyutlarında revizyona gidilerek gelinebilir. Bu revizyonda düzlemsel forma göre performans düşüşünün önüne geçilecek şekilde optimum anten performansını sağlayan anten boyutları hesaplanır. Bu çalışmada konformal yapıya geçişte anten performans-boyut optimizasyonu için CST simülatörü kullanılmıştır.

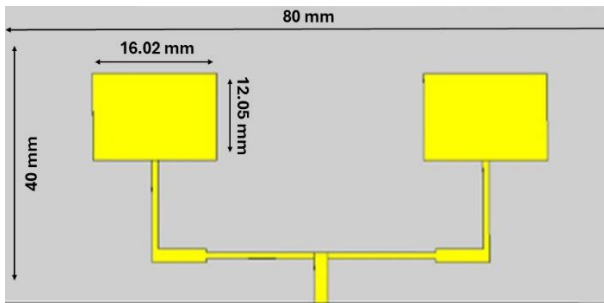
Anten elemanlarının konformal yüzeye mükemmel uyumunu sağlamak, genellikle karmaşık elektromanyetik benzetimler ve optimize edilmiş yerleştirme stratejileri gerektirir. Malzeme seçimi, elemanların konformal yüzeye bağlı olarak değişen geometrilerine uygun olmalıdır. Konformal antenlerde kullanılan malzemelerin elektromanyetik performansı, tasarımın başarısı açısından kritiktir. Bu antenlerde yaygın olarak kullanılan malzemeler, genellikle elektromanyetik dalgalarla etkileşimi optimize eden iletken malzemeler ve dielektrik malzemelerdir. Malzeme seçimi, antenin genel elektromanyetik performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada sunulan antende TU-872 LK malzemesi, maliyet etkin ve kolay üretilebilir olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Konformal antenlerde, yatay düzlemde anten konumunu belirlemek için bükme açıları uygulanmaktadır. Bu bükme açısı, antenin kavisli şekilde görünmesini sağlar. Anten tasarımı için C bandı, L ve S bandına göre daha küçük ve hafif olması sebebiyle ön plandadır. Bu çalışmada, 5.8

GHz tercih edilmiştir. Çalışmanın, uydu haberleşmesi üzerine literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır [22].

Radomlu konformal anten tasarımında tercih edilen 2x1 mikroşerit yama anten dizileri, yönlülük performanslarıyla öne çıkar. Bu anten dizileri, özellikle radar ve iletişim sistemlerinde belirli bir yöne odaklanabilme yetenekleri sayesinde hedefe yönlendirilmiş yüksek performans sağlar. Ayrıca, düşük profilli ve esnek entegrasyon özellikleri, radomlu konformal antenleri aerodinamik yapılar üzerinde kullanıldıklarında platform geometrisine uyumlu ve düşük aerodinamik dirençli kılar. Mikroşerit yama anten dizileri, geniş frekans aralıklarında çalışabilme yeteneği ile çeşitli iletişim ve algılama ihtiyaçlarına uyarlanabilirler. Ek olarak, maliyet etkin üretimleri ve standart üretim teknikleriyle uyumlulukları, radomlu konformal anten tasarımlarında ekonomik ve kullanışlı bir çözüm sunar [23,24,25].

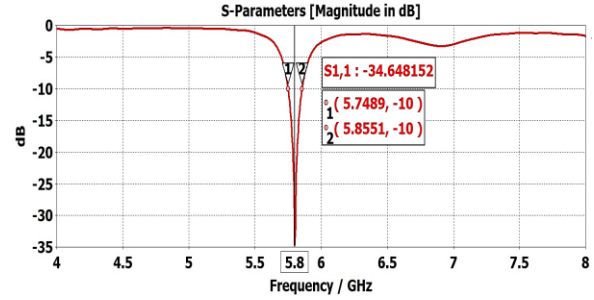
Anten tasarımı için baskı devre kolaylığından dolayı mikroşerit yapılar tercih edilmiştir. Altaş malzeme olarak 3.8'lik ϵ_r ve 0.009'luk $\tan\delta$ elektriksel parametrelere sahip TU-872 LK tercih edilmiştir. Bu malzeme modifiye edilmiş epoksi reçine ve E-Cam içermektedir [26].



Şekil 3: 2x1 mikroşerit yama anten dizisi.

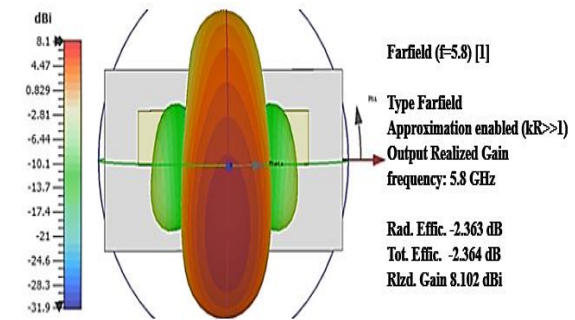
2x1 mikroşerit dizi anten Şekil 3'te gösterildiği gibi ilk olarak düzlemsel formda tasarlanmıştır.

Tasarlanan antenin yama genişliği 16.02 mm, yama uzunluğu ise 12.05 mm'dir. Altaş kalınlığı 0.8 mm, uzunluğu 40 mm, genişliği ise 80 mm'dir. İletim hattı kalınlıkları, 50 Ω 'a göre hesaplanmıştır.



Şekil 4: Geri dönüş kaybı (S_{11}) grafiği.

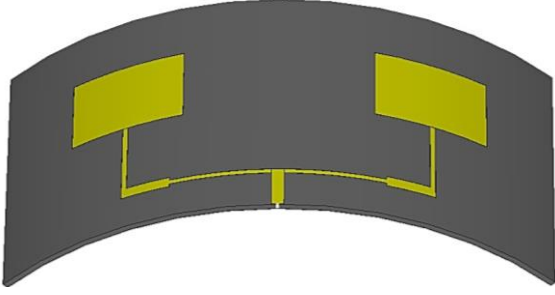
Tasarlanan düzlemsel anten için Şekil 4'te gösterildiği gibi 5.8 GHz'de (-34.64 dB)'lik S_{11} elde edilmiştir. Antenin yönlülüğü 10.5 dBi ve kazancı 8.1 dBi olarak bulunmuştur. Bant Genişliği (BG) ise yaklaşık 110 MHz olarak hesaplanmıştır. Şekil 5'te ise düzlemsel 2x1 dizi antenin ışıma örüntüsü gösterilmiştir. Düzlemsel tasarım konformal anten tasarımı için referans oluşturmaktadır.



Şekil 5: Anten ışıma örüntüsü.

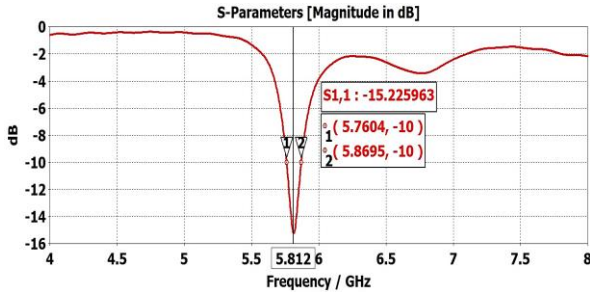
Bu tasarıma CST Bükme Aracı'nda (Bending Tool) 90° açıyla iki taraflı bükme ($\theta=90^\circ$) uygulanmıştır. Bu şekilde bükme yardımıyla şekillendirilen anten, bir silindirin çeyrek dairesine denk gelmektedir [27]. Oluşan yeni konformal antenin 5.8 GHz'de S_{11} ve kazanç

isterlerini sağlayamadığı görülmüştür. Bunun üzerine yama boyutları azaltılarak S_{11} optimize edilmiştir. Oluşturulan yeni antenin yama boyutları 15.44x11.57 mm'dir. Tasarlanan konformal anten geometrisi Şekil 6'da S_{11} ve ışınma örüntüsü grafikleri ise sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir.

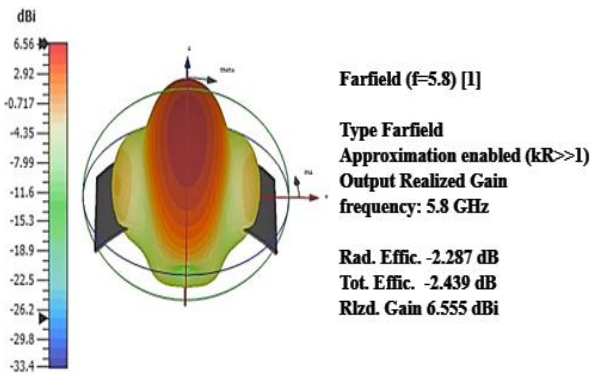


Şekil 6: Konformal anten geometrisi.

Şekil 6'ya göre konformal mikroşerit yama anten dizisi geometrisi 90° bükme (θ) açısına sahiptir. Bükme açısı, antenin yataydaki konumu hakkında bize bilgi vermektedir.



Şekil 7: Konformal Anten S_{11} grafiği.



Şekil 8: Konformal anten ışınma örüntüsü.

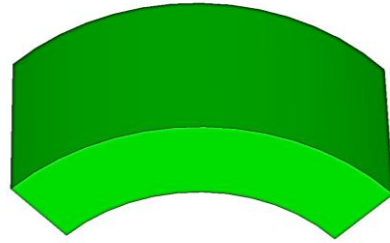
Tasarlanan konformal antenin yönlülüğü 8.99 dBi, kazancı, 6.56 dBi, S_{11} 'i (-15.22 dB) ve BG'si ise yaklaşık olarak 110 MHz'dir.

4. RADOMLU KONFORMAL ANTEN TASARIMI (RADOM CONFORMAL ANTENNA DESIGN)

Bölüm II'de, tek katman radom tasarımı detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde ise, radom-konformal anten ile birleştirilerek, radom-konformal anten etkileşimi, yönlülük, kazanç, S_{11} ve BG türünden incelenmiştir.

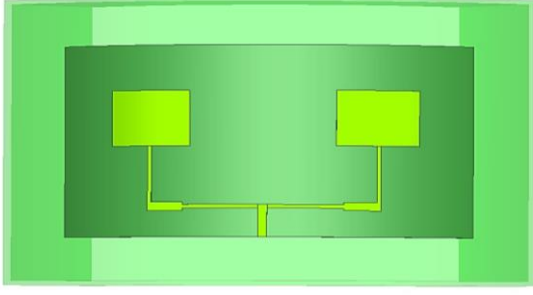
4.1 Tek Katman Radom ve Konformal Anten Entegrasyonu

Bir önceki bölümdeki elde edilen konformal anten, 1-mm E-Glass/Epoksi radom numunesinin içerisine yerleştirilerek radom-konformal anten performansı incelenmiştir.



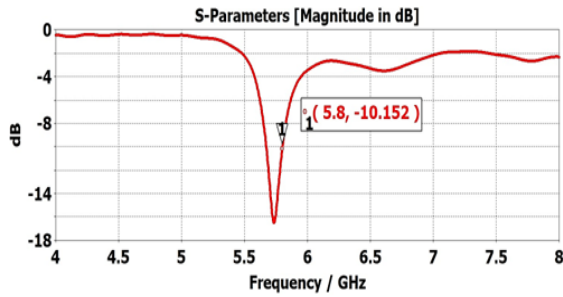
Şekil 9: 1-mm E-Glass/Epoksi radom.

Öncesinde birim hücre analizi yapılarak, iletim katsayısı elde edilen radom için anten geometrisine uygun bir biçimlendirme (bükme) sağlanmıştır. Çalışmada tasarlanan radom Şekil 9'da, radoma entegre edilmiş konformal anten ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Radom ile konformal anten, konformal anten tasarımındaki bükme açısı olan $\theta = 90^\circ$ bükme açısı ile CST ortamında birbirine entegre edilmiştir.



Şekil 10: Tek katman radomlu konformal anten.

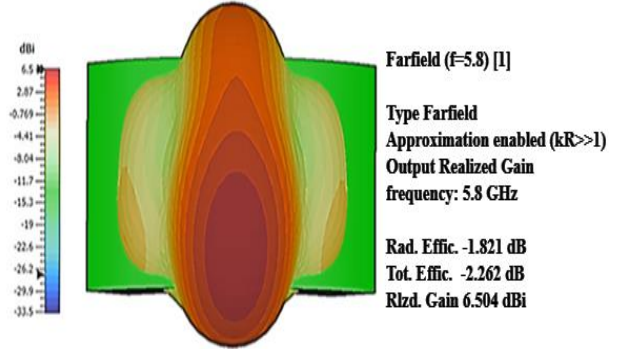
Mikroşerit dizi konformal anten, radomun içine Şekil 10'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu şekilde entegre bir tasarım oluşturulmuştur.



Şekil 11: Tek katman radomlu konformal antenin S_{11} değeri.

Radomun, elektromanyetik dalgalar üzerinde etkileri önceki bölümlerde anlatılmıştı. Radomun konformal antene entegrasyonun S_{11} , yönlülük, kazanç ve BG üzerindeki etkileri benzetim ortamında gözlenmiştir. Tek katman radomlu konformal antenin S_{11} grafiği Şekil 11'de gösterilmiştir. Burada, radom entegrasyonunda, karşılaşılmaması beklenen kayıplar S_{11} parametresine yansımıştır. Diğer bir deyişle konformal anten radoma entegre edildikten sonra, radomsuz konformal antenin merkez frekansında kayma olmuştur. Bu durum tasarım hedefi olan 5.8GHz frekansındaki S_{11} değerinde yaklaşık 5dB'lik artışa sebep olmuştur. Bunun sebebi, antenden yayılan elektromanyetik dalganın, bir kısmının radom yani malzeme ortamında, bir kısmının yansıyor, emiliyor ve iletiliyor

olmasıdır. Radomla entegre edilen antenlerde meydana gelen makul düzeyde performans azalışı beklenen bir durumdur. Radomun tam olarak etkisinin gözlenmesi için malzemenin, yansıma ve iletim katsayısının çıkarılması kadar, anten-radom etkileşiminin anten performansına olan etkisinin incelenmesi de önemlidir.



Şekil 12: Tek katman radomlu konformal anten ışınma örüntüsü.

Şekil 12'de tek katman radomlu konformal antene ait ışınma örüntüsü verilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, 5.8 GHz'de radomlu konformal antenin yönlülüğü 8.77 dBi, kazancı 6.5 dBi ve S_{11} değeri ise (-10.152) dB'dir. Rezonansın en iyi olduğu kısımda S_{11} değeri -16.204 dB ve çalışma frekansı 5.742 GHz'dir. 5.8 GHz bandında radomun etkisi gösterilmesi amaçlandığından ve ISM çalışma bandı olarak seçildiğinden bu şekilde raporlanmıştır.

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Makalenin bu bölümünde düzlemsel anten, konformal anten ve radomlu konformal antenlerin performansları karşılaştırılmıştır. 5.8GHz merkez frekansında düzlemsel anten, konformal anten ve radomlu konformal antenlerin yönlülük, kazanç, S_{11} ve BG karşılaştırmaları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'e göre en iyi kazanç, yönlülük ve S_{11} performansına sahip tasarım düzlemsel antendir.

Antenin konformal hale getirilmesiyle kazanç ve yönlülük değerleri yaklaşık 2'şer dB azalmışken 5.8GHz frekansında S_{11} yaklaşık 19 dB azalmıştır. Anten kullanılması planlanan sabit kanat bir insansız hava platformu ile uyumlu olacak şekilde 90^0 bükme açısı ile konformal hale getirildiğinde tasarlanan konformal antenin istekleri karşıladığı görülmektedir. Son adımda radom ve konformal anten 90^0 bükme açısı ile platform ile uyumlu olacak şekilde birleştirildiğinde radomlu konformal antenin kazancı radomsuz konformal anten ile yaklaşık aynı değere sahipken, S_{11} 5dB azalarak (-10.152dB) değerini almıştır. Benzetim sonuçlarına göre radomlu konformal anten tasarımı için elde edilen bant genişliği, kazanç, yönlülük ve S_{11} sonuçlarının seçilen uygulama için yeterli olduğu ve literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Düzlemsel yapıdan konformal yapıya geçişte konformal yapıdan da radomlu konformal yapıya geçişte karşılaşılan bu performans kaybı beklenen bir durumdur. Diğer bir beklenen durumda bir radomun, bir antenin üzerine yerleştirilmesinin, radome malzemesindeki dalga zayıflaması ve radomun yansımaları nedeniyle anten kazancını azalttığıdır [28].

Sadece anten tasarımı için değil frekans seçici yüzeyler için de düzlemsel yapıdan konformal yapıya geçiş frekans tepkisini ve elektromanyetik performansı değiştirebilmektedir [29]. Nihai olarak, bu çalışma ile radomlu-konformal yapıda haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere bir anten tasarlanmıştır.

Tablo 1: Düzlemsel, konformal, radomlu konformal anten tasarımlarının performans karşılaştırması (@ 5.8 GHz).

	Yönlülük (dBi)	Kazanç (dBi)	S_{11} (dB)	BG (MHz)
Düzlemsel Anten	10.5	8.1	-34.64	110
Konformal Anten	8.99	6.56	-15.22	110
Radomlu Konformal Anten	8.77	6.50	-10.152	105

Ek olarak çalışmamızın nihai tasarımını teşkil eden konformal anten ve radomlu konformal anten performanslarının literatür ile karşılaştırılması Tablo 2'de sunulmuştur. İlk incelenen çalışmada, radomlu çift konik anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımda, a-sandviç ve tek katmanlı radom yapıları incelenmiştir. Üretim kolaylığı açısından tek katmanlı radom seçilmiştir. Entegre tasarım yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Radomun anten kazancına ve S_{11} parametresine olan etkisi Tablo 2'de [30]. İkinci çalışmada, frekans seçici yüzey radom tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada, radom anten etkileşimi için iki anten incelenmiştir. İncelenen antenler vivaldi ve horn antendir. Horn antenin radom ile etkileşimi benzer şekilde Tablo 2'de karşılaştırılmıştır [31].

Karşılaştırma yapılan son çalışmada, metamalzeme radom yapısı incelenmiştir. Bu tasarımda, radomun anten kazancını artırması amaçlanmıştır [32]. Ayrıca, Bakır, M., çalışmasında düzlemsel yama anten yapısının, 2 mm kalınlığında Kuvars ve Cam türü radomlar altında analizleri sağlanmış ve sonuçların neredeyse aynı olduğu bilgisi paylaşılmıştır [33].

Sonuç olarak, örnekler incelendiğinde bu makaledeki çalışmanın, literatürü yakaladığı ve

radom, anten tasarımıyla ilgili güncel veriler sunduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmanın anten ve radom tasarımcılarına örnekler sunması amaçlanmıştır.

Çalışmamızın ilerleyen aşamalarında ise, radom anten entegrasyonunda, radom malzemesinin anten performansına etkisini anlayabilmek adına benzetim ortamında farklı radom malzemeleri konformal anten ile birleştirilecek ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

Tablo 2: Radom entegre edilmiş-edilmemiş antenlerin karşılaştırma tablosu.

Ref.	Frekans	Kazanç (Radomsuz)	Kazanç (Radomlu)	S_{11} (Radomsuz)	S_{11} (Radomlu)
[30]	18 GHz	3.99 dB	3 dB	-22.094 dB	-15.294 dB
[31]	10 GHz	11.12 dB	10.03 dB	< -25 dB	-
[32]	6.2-6.4 GHz	7.1 dB	7.9 dB	-15 dB	-19 dB
Bu Makale	5.8 GHz	6.56 dB	6.5 dB	-13.457 dB	-10.152 dB

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, öncelikle tek katman radom tasarımı yapılmış, sonrasında 2x1 düzlemsel mikroşerit yama anten ve aynı özelliklerde konformal anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada anteni düzlemsel formdan konformal forma getirmenin anten performansına olan etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra radom ve konformal anten birleştirilerek radomun anten parametrelerine olan etkisi incelenmiştir. Radomlar, kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan antenlerin performansını etkileyen önemli parçalardır.

Çalışmada tasarlanan tek katman radomun iletim katsayısı, 5.8 GHz’ de (-0.21) dB’dir. Önerilen konformal antenin, radomsuz halinin, yönlülüğü, 8.99 dBi, kazancı, 6.56 dBi, S_{11} ’i (-15.22) dB ve BG’si yaklaşık 110 MHz’dir. Konformal anten radomla entegre edildiğinde ise, radomun etkilerinden dolayı bu parametrelerde değişim

yaşanmıştır. Radomlu anten için yönlülük 8.77 dBi, kazanç, 6.5 dBi ve 5.8 GHz’de S_{11} ’i (-10.152) dB’dir. Radomlu tasarımda hem merkez frekansı kaymıştır hem de bant genişliği 5MHz kadar azalmıştır. Radomlu tasarımın S_{11} ’inde yaklaşık 5dB’lik bir performans düşüşü meydana gelmiştir. Bu performans kayıpları radom kaynaklıdır. Çünkü antenden yayılan elektromanyetik dalga farklı bir malzeme ortamına temas ettiğinde, makalenin giriş bölümünde verilen radom tasarımı formüllerinden de anlaşılacağı üzere, yansıma, emilim ve iletim gibi olaylarla karşılaşılacaktır. Bu gibi durumları azaltmak ve üstesinden gelmek için daha düşük dielektrik katsayısına sahip malzemeler radom tasarımında tercih edilebilir. Tercih edilen malzeme, üretilebilir olmalıdır ve frekansa göre kaybı optimal şekilde antene göre ayarlanmalıdır. Bu çalışma radom için, ucuz, kolay bulunabilir olduğu için ve üretim kolaylığı

özelliklerinden dolayı E-Cam Elyaf/Epoksi ile tek katman olacak şekilde tasarlanmıştır. Radomlu konformal antenin benzetim sonuçları düzlemsel anten ve konformal anten ile karşılaştırılarak radomun etkisinin anten performansına olan etkisi açıklanmak istenilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile 5.8 GHz’de havacılık uygulamalarında kullanılabilecek radomlu konformal mikroşerit yama anten dizisi tasarımı önerilmiştir.

Bu çalışma, aerodinamik olarak yüzeylere uyumlu tasarlanan konformal antenin, radom tasarımı ve radomlu incelenmesini sağlamıştır. Havacılık ve uzay çalışmalarında, radomlar ve antenler bir arada kullanılmaktadır. Önerilen anten bu çalışmalara katkı sağlamak isteyen mühendis ve araştırmacılara yol gösterecektir. Literatüre radom ve anten mühendisliği ile ilgili olan bir referans alınabilecek bir tasarım ve analiz sunulmuştur.

YAZAR KATKILARI (AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT)

Burak Can KIŞLA: Literatür taraması, benzetimler ve sonuçların analizi bu yazar tarafından yapılmıştır. Orijinal taslak da bu yazar tarafından hazırlanmıştır.

Bilge ŞENEL: Çalışmanın kavramsallaştırılması ve süpervizyonu ikinci yazar tarafından yapılmıştır. Kontrolörün metodolojisi, orijinal taslağın yazılması, düzenlenmesi ve gözden geçirilmesi yine bu yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Josefsson, L., Persson, P., "Conformal Array Antenna Theory and Design", Wiley-IEEE Press, 2006.
- [2] Kozakoff, D. J., Analysis of Radome-enclosed Antennas, Artech House, 2010.
- [3] Shavit, R., Radome Electromagnetic Theory and Design, Wiley, 2018.
- [4] Walton J. D., (Radome Engineering Handbook. J. D. Walton (Ed.) Marcel Dekker, New York, 1970.
- [5] Kai-Dong Hong, Shida Zhong, Xiao Zhang, Lei Zhu, Zhe Chen, Tao Yuan, A monolithic missile radome with improved radiation patterns for application in frequency modulated continuous wave radar, AEU - International Journal of Electronics and Communications, Volume 132, 2021.
- [6] Patel, Shobhitkumar Kiritkumar & Shah, Karan & Kosta, Y., Multilayer liquid metamaterial radome design for performance enhancement of microstrip patch antenna. Microwave and Optical Technology Letters, 2018.
- [7] Farr David, Henderson, William "Airborne Antenna Considerations For C-Band Telemetry Systems", Sat Magazine, A.B.D., Mayıs 2014.
- [8] Monica, J. & Vishnu Prakash, Dr.Jothilakshmi. (2020). A Design of Bandwidth-Enhanced Conformal Antenna for Aircraft Applications. IETE Journal of Research. 69. 1-13, 2020.
- [9] H. Wang, Y. Zhao, K. Huang, T. Liu and P. Gao, "Design of a High-Performance Radome for Satellite Communication Phased Array Antennas," 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES), Beijing, China, 2018.

- [10] Chethan Kumar, Habeeb Ur Rahman Mohammed and Greg Peake, mmWave Radar Radome Design Guide, Texas Instruments, 2022.
- [11] Parini, Clive & Sheret, Tamara & Allen, B.. (2016). Efficient Design of a Radome for Minimised Transmission Loss. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 10, 2016.
- [12] Qamar, Zeeshan & Aboserwal, Nafati & Salazar, Jorge., An Accurate Method for Designing, Characterizing, and Testing a Multi-Layer Radome for mm-Wave Applications. IEEE Access. PP. 1-1, 2020.
- [13] Sivagnanam, Ilavarasu & Niranjappa, A.C. & Singh, M. & Narayana, P.A.A., An approach to the design of composite radome for airborne surveillance application. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018.
- [14] Qamar, Zeeshan & Salazar, Jorge & Aboserwal, Nafati, "An Ultra-Wide Band Radome for High-Performance and Dual-Polarized Radar and Communication Systems" IEEE Access, 2020.
- [15] Balanis, C., "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, Hoboken, 1989.
- [16] Vera-Dimas, José & Tecpoyotl-Torres, Margarita & García-Limón, J.A. & Zezzatti, C.. Experimental test of epoxy resin as a radome for patch antennas. Procedia Engineering. 35. 155–164, 2012.
- [17] Cheng, D. K., "Field and Wave Electromagnetics," 2nd Edition, Pearson Education Limited, London, England, 2014.
- [18] L. Zhou, Y. Pei and D. Fang, "Dual-Band A-Sandwich Radome Design for Airborne Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016.
- [19] Lee, K., Chung, Y., Hong, I., & Yook, J. An effective design procedure for A-Sandwich radome., IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2010.
- [20] Kışla, Burak Can, Şenel. Bilge, "Havacılık Uygulamaları için C Bandı Konformal Anten Tasarımı," URSI-TR'23 Bilimsel Kongresi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2023.
- [21] M. M. H. Mahfuz and C. -W. Park, "Review of Patch Antennas used in Drone Applications," in IEEE Access, 2023.
- [22] N. Sharma, A. Kumar, A. De and R. K. Jain, "Circularly Polarized Antenna for ISM (5.8 GHz), Satellite Communications and UWB Applications," SPIN Noida, Hindistan, s. 303-307 Ağustos 2021.
- [23] Ngobese, B. & Kumar, P.. A high gain microstrip patch array for 5 GHz WLAN applications, 2018.
- [24] Ipekoglu Y., Yucedag, O. M., "Microstrip patch antenna array design for C-band electromagnetic fence applications," 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2015, pp. 355-358.
- [25] Amir, N.A., Hamzah, S.A., Ramli, K.N., & Esa, M., 2×1 microstrip patch array antenna with harmonic suppression capability, APACE, 2016.
- [26] Taiwan Union Technology Corporation, "TU-872 LK Datasheet", Zhubei, Tayvan 2023.
- [27] Dassault Systemes, "CST Studio Suite Help", 2023.
- [28] Kim, T., Kumar, S., Ravikumar, C. V., Ahmad, S., Yepuganti, K., & Varma, P. S., "Evaluation of a double-lens dielectric radome using a microstrip patch antenna for electromagnetic applications", Ain Shams Engineering Journal, 2024.
- [29] Korkut, N. A., Kara, A., & Yardım, F. E. "Conformal Frequency Selective Surfaces in Radome Design: A Mini Review" Savunma Bilimleri Dergisi, 20(2), 211-222, 2024.

[30] Çor, İsmail, Çok Geniş Bantlı Doğrudan Beslenmiş Radomlu Çift Konik Anten Analiz ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2018.

[31] Topçuoğlu, Cumhur, X Bant Frekans Seçici Yüzeyle Radom Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi İstanbul, 2018.

[32] Patel, Shobhitkumar Kiritkumar & Kosta, Y. & Charola, Shreyas., Liquid metamaterial based radome design. Microwave and Optical Technology Letters. 60, 2018.

[33] Bakır M. Quartz Fiber Radome and Substrate for Aerospace Applications. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering, 2023.